

Guia Prático do Biogás

Geração e Utilização



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages





Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás

O PROBIOGÁS é um projeto inovador no país coordenado pelo Ministério das Cidades e pela GIZ que conta com uma rede de parcerias nas esferas governamental, acadêmica e empresarial.

Para alcançar o objetivo de ampliar o aproveitamento energético de biogás no Brasil, o PROBIOGÁS tem como principais linhas de atuação:

- apoio técnico aos agentes relevantes para o desenvolvimento de políticas públicas,
- normas técnicas e projetos de referência;
- capacitação de instituições estratégicas nos setores de energia e saneamento;
- facilitação do desenvolvimento de parcerias de negócio e de pesquisa;
- criação de redes de competência entre Brasil e Alemanha.

O projeto financiou a versão em português do „Leitfaden Biogas“.

Informações:

www.cidades.gov.br/saneamento

www.giz.de/brasil

snsa.darin@cities.gov.br

probiogas@giz.de



Por meio de:



Ministério das
Cidades



Guia Prático do Biogás

Geração e Utilização

Responsável pelo projeto: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Internet: www.fnr.de

Em nome do: Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (BMELV)
Internet: www.bmelv.de

Apoio editorial: Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ)
Internet: www.dbfz.de

Parceiros: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)
Internet: www.ktbl.de

Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Internet: www.vti.bund.de/de/institute/ab/

Escritório de advocacia Schnutenhaus & Kollegen
Internet: www.schnutenhaus-kollegen.de

Editor: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

Redação: FNR, Departamento de Relações Públicas

Tradução: Eng. Ftal. Marcos de Miranda Zattar

Revisão da tradução: Jens Giersdorf, Luis César da Costa Jr., Vanessa Pecora Garcilasso, Victor Bustani Valente

Direitos autorais (capa): Mark Paterson / FNR; Werner Kuhn / LWG; FNR / iStockphoto

Layout: www.tangram.de, Rostock

5ª edição, totalmente revista e atualizada, Gülzow, 2010

Todos os direitos reservados.
Não é permitida a reprodução, processamento, distribuição ou arquivamento desta obra, total ou parcial, sem a permissão por escrito do editor.

Conteúdo



Índices

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	11
Índice de Autores.....	15

1 Finalidade deste Guia..... 16

M. KALTSCHMITT, F. SCHOLWIN

1.1	Objetivo.....	16
1.2	Abordagem.....	17
1.3	Conteúdo.....	17
1.4	Público-alvo.....	17
1.5	Definição do escopo.....	18
1.5.1	Tecnologia.....	18
1.5.2	Substratos.....	18
1.5.3	Atualidade dos dados.....	19
1.5.4	Escopo dos dados.....	19

2 Fundamentos da Fermentação Anaeróbia 20

J. FRIEHE, P. WEILAND, A. SCHATTAUER

2.1	Origem do biogás.....	20
2.2	Condições do meio.....	21
2.2.1	Oxigênio.....	22
2.2.2	Temperatura.....	22
2.2.3	Valor do pH.....	23
2.2.4	Disponibilidade de nutrientes.....	23
2.2.5	Inibidores.....	24
2.3	Parâmetros operacionais.....	25
2.3.1	Carga orgânica volumétrica e tempo de retenção no biodigestor.....	25
2.3.2	Produtividade, rendimento e taxa de degradação.....	26
2.3.3	Agitação.....	27
2.3.4	Potencial de geração de gás e atividade metanogênica.....	27
2.4	Fontes bibliográficas.....	30

3 Tecnologia de Usinas para a Produção de Biogás 31

J. POSTEL, U. JUNG, EL. FISCHER, F. SCHOLWIN, T. WEIDELE, H. GATTERMANN, A. SCHATTAUER, P. WEILAND

3.1	Características e diferenciação das diferentes técnicas.....	31
3.1.1	Teor de matéria seca dos substratos de fermentação.....	31
3.1.2	Tipo de alimentação.....	32
3.1.3	Número de fases e estágios do processo.....	33

3.2	Técnica de processamento.....	33
3.2.1	Gerenciamento de substrato.....	34
3.2.2	Geração de biogás.....	52
3.2.3	Armazenamento do substrato digerido.....	67
3.2.4	Armazenamento do biogás.....	69
3.3	Normas e recomendações técnicas relevantes.....	72
3.4	Fontes bibliográficas.....	72

4 Descrição de Substratos Selecionados..... 74

J. FRIEHE, P. WEILAND, A. SCHATTAUER

4.1	Substratos da agricultura.....	74
4.1.1	Adbos orgânicos.....	74
4.1.2	Biomassas dedicadas.....	75
4.2	Substratos da agroindústria de transformação.....	78
4.2.1	Fabricação de cerveja.....	78
4.2.2	Produção de álcool.....	79
4.2.3	Produção de biodiesel.....	79
4.2.4	Processamento de batatas (fabricação de amido).....	80
4.2.5	Produção de açúcar.....	80
4.2.6	Subprodutos do beneficiamento de frutas.....	80
4.3	Subproduto vegetal conforme a EEG.....	80
4.4	Propriedades e produção de subprodutos vegetais.....	81
4.5	Resíduos verdes e grama.....	81
4.6	Material proveniente de atividades de conservação da paisagem.....	82
4.7	Fontes bibliográficas.....	82
4.8	Anexo.....	84

5 Operação de Usinas de Biogás 85

J. LIEBETRAU, J. FRIEHE, P. WEILAND, A. SCHREIBER

5.1	Dados característicos da monitoração do processo biológico.....	85
5.1.1	Taxa de produção de biogás.....	86
5.1.2	Composição do gás.....	86
5.1.3	Temperatura.....	87
5.1.4	Quantidade de entrada e nível de enchimento.....	87
5.1.5	Caracterização do substrato.....	88
5.1.6	Determinação da concentração de ácidos orgânicos.....	88
5.1.7	Valor do pH.....	90
5.1.8	Concentração de micronutrientes.....	90
5.1.9	Nitrogênio, amônio, amônia.....	91
5.1.10	Sobrenadante.....	92
5.1.11	Formação de espuma.....	93
5.1.12	Avaliação do processo.....	93
5.2	Monitoramento e automação da usina.....	94
5.2.1	Sistema de bus.....	95
5.2.2	Planejamento da configuração.....	95
5.2.3	Aplicações/visualização.....	95
5.2.4	Registro de dados.....	96
5.2.5	Controle de processo retroalimentado.....	96
5.3	Controle do processo na partida e operação regular.....	98
5.3.1	Operação regular.....	98
5.3.2	Processo de partida.....	99

5.4	Gestão de distúrbios	103
5.4.1	Causas dos distúrbios do processo.....	103
5.4.2	Manejo de distúrbios do processo	105
5.4.3	Manejo de falhas e problemas técnicos.....	106
5.5	Segurança operacional.....	107
5.5.1	Proteção no trabalho e na usina.....	107
5.5.2	Proteção do meio ambiente	109
5.6	Notas sobre a otimização de usinas.....	110
5.6.1	Otimização técnica.....	111
5.6.2	Análise da eficiência da usina como um todo (utilização do substrato com base nos fluxos de energia)	112
5.6.3	Otimização econômica	112
5.6.4	Mitigação dos impactos ambientais	113
5.7	Fontes bibliográficas	113

6 Tratamento do Biogás e Opções de Utilização..... 115

M. WEITHÄUSER, F. SCHOLWIN, ER. FISCHER, J. GROPE, T. WEIDELE, H. GATTERMANN

6.1	Purificação e tratamento do biogás	115
6.1.1	Dessulfurização	115
6.1.2	Secagem	118
6.1.3	Remoção do dióxido de carbono	121
6.1.4	Separação do oxigênio.....	123
6.1.5	Separação de outros gases traço	124
6.1.6	Tratamento visando qualidade de gás natural	124
6.2	Uso em usinas de cogeração	124
6.2.1	Usinas de cogeração com motores de combustão	125
6.2.2	Motores Stirling.....	132
6.2.3	Microturbinas a gás	133
6.2.4	Células de combustível	134
6.2.5	Uso do calor residual em sistemas de cogeração prioritária de eletricidade	135
6.3	Injeção de biogás	137
6.3.1	Injeção na rede de gás natural.....	137
6.3.2	Injeção em microrredes de gás.....	138
6.4	Combustível para veículos.....	138
6.5	Biogás como fonte de energia térmica.....	139
6.6	Fontes bibliográficas	140

7 Condições Legais e Administrativas 142

H. VON BREDOW

7.1	Subsídio de energia elétrica de biomassa	142
7.1.1	O sistema de bônus na EEG.....	142
7.2	Conexão à rede e injeção de energia elétrica.....	143
7.2.1	Conexão à rede elétrica	143
7.2.2	Gerenciamento da injeção de energia	144
7.2.3	Injeção de energia elétrica e comercialização direta	145
7.3	Remuneração pela EEG	145
7.3.1	Fundamentos da determinação da remuneração.....	145
7.3.2	Conceito de usina e início de operação – determinação correta do valor da remuneração	147
7.3.3	Pormenores da remuneração	149

7.4	Tratamento de gás e injeção	155
7.4.1	Pré-requisitos para a remuneração da EEG	156
7.4.2	Transporte do ponto de injeção até a usina de cogeração	156
7.4.3	Condições legais para a conexão à rede de gás natural e utilização da rede	157
7.5	Utilização do calor e fornecimento	158
7.5.1	Condições legais	158
7.5.2	Fornecimento de calor	158
7.5.3	Redes de aquecimento	159
7.6	Literatura recomendada	159
7.7	Fontes bibliográficas	159

8 Economia..... 161

S. HARTMANN, B. WIRTH, A. NIEBAUM, H. DÖHLER, U. KEYMER, G. REINHOLD

8.1	Representação das usinas-modelo – Hipóteses e dados característicos	161
8.1.1	Potência das usinas	161
8.1.2	Substratos	161
8.1.3	Projeto técnico e biológico	163
8.1.4	Valores característicos técnicos e de processos	165
8.1.5	Investimentos para as unidades funcionais das usinas-modelo	165
8.2	Economia das usinas-modelo	168
8.2.1	Receitas	168
8.2.2	Custos	169
8.2.3	Análise custo/benefício	171
8.3	Análise de sensibilidade	172
8.4	Eficiência econômica dos canais de utilização de calor selecionados	173
8.4.1	Canal de utilização do calor para secagem	174
8.4.2	Canal de utilização do aquecimento de estufas	178
8.4.3	Canal de utilização do calor – rede municipal de calor	178
8.5	Classificação qualitativa de diferentes canais de utilização de calor	181
8.6	Fontes bibliográficas	181

9 Organização Operacional 182

G. REINHOLD, S. HARTMANN, A. NIEBAUM, R. STEPHANY, P. JÄGER, M. SCHWAB

9.1	Reestruturação da empresa – perspectivas e abordagens para a otimização	184
9.1.1	Definição de um local adequado para a usina	184
9.1.2	Impacto da usina de biogás na rotação de culturas	185
9.1.3	Demanda de terra e tempo de trabalho	185
9.1.4	O fator tempo na tecnologia	191
9.2	Fontes bibliográficas	192

10 Qualidade e Aproveitamento dos Biofertilizantes 193

H. DÖHLER, S. WULF, S. GREBE, U. ROTH, S. KLAGES, T. AMON

10.1	Propriedades dos biofertilizantes	193
10.1.1	Propriedades, nutrientes e substâncias de enriquecimento	193
10.1.2	Poluentes	194
10.1.3	Propriedades sanitárias	194
10.2	Armazenamento dos biofertilizantes	196
10.2.1	Emissões de amônia	196
10.2.2	Emissões relevantes ao clima	197

10.3	Utilização dos biofertilizantes em áreas agrícolas.....	199
10.3.1	Disponibilidade e efeito nutritivo do nitrogênio	199
10.3.2	Medidas para reduzir as perdas de amônia após a deposição de biofertilizantes.....	200
10.4	Tratamento de biofertilizantes	201
10.4.1	Técnicas de tratamento.....	202
10.4.2	Utilização do biofertilizante tratado	205
10.4.3	Comparação dos processos de tratamento de biofertilizantes.....	207
10.5	Fontes bibliográficas	207
11	Realização de um Projeto	209
	ER. FISCHER, F. SCHOLWIN, A. NIEBAUM, A. SCHATTAUER	
11.1	Ideia e esboço do projeto	209
11.2	Estudo de viabilidade	210
11.2.1	Disponibilidade de substrato	212
11.2.2	Seleção do local	212
11.2.3	Logística do fluxo de materiais	214
11.2.4	Selecionar a tecnologia	215
11.2.5	Utilização de gás	215
11.2.6	Avaliação e tomada de decisão.....	216
11.3	Fontes bibliográficas	217
12	Importância do Biogás como Fonte de Energia Renovável na Alemanha ..	218
	M. KALTSCHMITT, F. SCHOLWIN, J. DANIEL-GROMKE, B. SCHUMACHER, A. SCHEUERMANN, R. WILFERT	
12.1	Geração de biogás como opção de aproveitamento energético da biomassa.....	218
12.2	Importância ecológica e sustentabilidade da geração e aproveitamento do biogás	219
12.3	Situação atual da geração e aproveitamento do biogás na Alemanha	221
12.3.1	Parque de usinas e potências.....	221
12.3.2	Aplicações do biogás e tendências	223
12.3.3	Substratos utilizados	223
12.4	Potencialidades.....	224
12.4.1	Potencial técnico de energia primária.....	224
12.4.2	Potencial técnico de energia final	225
12.5	Conclusões.....	226
12.6	Fontes bibliográficas	227
	Glossário	228
	Índice de abreviaturas.....	231
	Endereços das instituições.....	233

Lista de Figuras

Figura 2.1:	Esquema da decomposição anaeróbia	20
Figura 2.2:	Relação entre a carga orgânica volumétrica e o tempo de retenção hidráulica para diferentes concentrações de substrato	26
Figura 3.1:	Esquema da técnica de fluxo contínuo	32
Figura 3.2:	Esquema da técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento	33
Figura 3.3:	Diagrama genérico do processo de geração de biogás.....	34
Figura 3.4:	Esquema de uma usina de biogás agrícola com utilização de cosubstrato	35
Figura 3.5:	Separador de materiais pesados em tubulação	36
Figura 3.6:	Reservatório de alimentação com desagregador	37
Figura 3.7:	moinho de martelo e de rolo para fragmentação de substratos sólidos	38
Figura 3.8:	fragmentação de substrato na linha de transporte (tritador de prato perfurado)	39
Figura 3.9:	bomba submersível com arestas de corte no rotor da unidade de fragmentação e transporte	41
Figura 3.10:	Higienização com resfriamento	41
Figura 3.11:	Bombas em uma usina de biogás	42
Figura 3.12:	Bomba de cavidade progressiva	44
Figura 3.13:	Bomba de lóbulos (esquerda), princípio de bombeamento do pistão rotativo (direita)	45
Figura 3.14:	Enchimento do tanque de carga e alimentação	46
Figura 3.15:	Introdução indireta de substrato sólido (esquema)	47
Figura 3.16:	Introdução direta de substrato sólido (esquema)	47
Figura 3.17:	Bombas dotadas de tremonha com bomba de lóbulos integrada (esquerda) e bomba de cavidade progressiva (direita)	47
Figura 3.18:	Carregamento de biomassa empilhável com pistão de alimentação	48
Figura 3.19:	Carregamento de biomassa empilhável com transportador helicoidal	49
Figura 3.20:	Tubulações e válvulas em uma estação de bombeamento, válvulas de gaveta	51
Figura 3.21:	Plataforma de trabalho entre dois reservatórios com tubulação e dispositivos de alívio de pressão (esquerda); tubulação de gás com soprador compressor (direita)	52
Figura 3.22:	Biodigestor de mistura completa com agitador de eixo longo e demais equipamentos	54
Figura 3.23:	Reator de fluxo pistonado (digestão úmida)	54
Figura 3.24:	Reator de fluxo pistonado (digestão seca)	54
Figura 3.25:	Biodigestor de fluxo pistonado; exemplos práticos, cilíndrico (esquerda), retangular, com gasômetro montado no topo (direita)	55
Figura 3.26:	Exemplo de biodigestor de baia; bateria de biodigestores e portão do biodigestor	55
Figura 3.27:	Biodigestor de câmara dupla	55
Figura 3.28:	Exemplos de configurações especiais na fermentação a seco; reator sequencial em batelada (esquerda), biodigestor de baia com agitador (centro), estágio de metanização da digestão seca/úmida e gasômetro externo (direita)	57
Figura 3.29:	Construção de um biodigestor de concreto	57
Figura 3.30:	Biodigestor de aço inoxidável em fase de construção	59

Figura 3.31:	AMS com hélice (esquerda), tubulação guia (centro), grande pá (direita)	61
Figura 3.32:	Agitadores de eixo longo com dois dispositivos de agitação, com e sem apoio no fundo do biodigestor	62
Figura 3.33:	Agitador axial	63
Figura 3.34:	Agitador de pás	63
Figura 3.35:	Separador de rosca	64
Figura 3.36:	Dispositivos para transportar o gás sem distúrbios; tubo de admissão de gás com abertura voltada para cima (alimentação de substrato à esquerda)	65
Figura 3.37:	Tubos de aquecimento de aço inoxidável instalados em biodigestor (no lado interno) (esquerda); montagem de mangueiras de aquecimento no biodigestor (direita)	68
Figura 3.38:	Gasômetros de lona	70
Figura 3.39:	Base de suporte de cobertura inflável (esquerda); usina de biogás com coberturas infláveis	71
Figura 3.40:	Gasômetro de camada dupla	71
Figura 3.41:	Flare de uma usina de biogás	72
Figura 5.1:	Inibição da metanogênese do ácido acético pelo NH_3	92
Figura 5.2:	Esquema de monitoramento da usina	96
Figura 5.3:	Regime de carregamento na partida	100
Figura 5.4:	Curso da fase de partida biodigestor 1	101
Figura 5.5:	Curso da fase de partida biodigestor 2	102
Figura 5.6:	Curso da fase de partida biodigestor 3	102
Figura 5.7:	Curso da fase de partida biodigestor 1 sob deficiência de micronutrientes	103
Figura 5.8:	Possibilidades de otimização	111
Figura 6.1:	Controle de gás para soprimento de ar no gasômetro do biodigestor	117
Figura 6.2:	Coluna de biodessulfurização externa, à direita ao lado de um gasômetro	118
Figura 6.3:	Estação de tratamento de biogás (lavagem Genosorb) em Ronnenberg	123
Figura 6.4:	Estrutura esquemática de uma usina de cogeração	125
Figura 6.5:	Usina de cogeração com biogás, módulo completo em construção compacta com sistema de queima em flare	125
Figura 6.6:	Eficiência elétrica de usinas de biogás para a cogeração	128
Figura 6.7:	Distribuidor de calor	129
Figura 6.8:	Usina de cogeração com linha de gás	130
Figura 6.9:	Construção de uma usina de cogeração em uma edificação ou em container	132
Figura 6.10:	Modo de operação de um motor Stirling conforme referências bibliográficas	133
Figura 6.11:	Estrutura de uma microturbina a gás	133
Figura 6.12:	Princípio de funcionamento de uma célula de combustível	135
Figura 6.13:	Esquema de funcionamento de um refrigerador de absorção	136
Figura 6.14:	Exemplo de refrigerador de absorção em uma usina de biogás	136
Figura 8.1:	Canais de utilização do calor para usinas de biogás com processo de cogeração	175
Figura 9.1:	Opções do empresário agrícola no ramo do biogás	182
Figura 9.2:	Fatores de influência sobre a escolha do local	185
Figura 9.3:	Trabalho específico exigido em diferentes atividades com integração da geração de biogás	187
Figura 9.4:	Tempo de trabalho necessário para a supervisão da usina	189
Figura 9.5:	Tempo de trabalho necessário para a supervisão e manutenção da usina	189
Figura 9.6:	Tempo de trabalho necessário para a usina-modelo III	192

Figura 10.1:	Correlação entre o potencial relativo de gás residual a 20 – 22 °C e o tempo de retenção hidráulica	197
Figura 10.3:	Distribuidor com reboque de sapatos.....	201
Figura 10.4:	Distribuidor de sulcos	201
Figura 10.2:	Distribuidor com reboque de mangueiras	201
Figura 10.5:	Cultivador de distribuição de esterco.....	201
Figura 10.6:	Períodos de deposição para biofertilizantes	202
Figura 10.7:	Classificação dos processos de tratamento conforme o seu princípio.	203
Figura 11.1:	Etapas de realização de um projeto para a geração e aproveitamento de biogás	209
Figura 11.2:	Diagrama sintético do planejamento de uma usina de biogás.....	210
Figura 11.3:	Critérios do estudo de viabilidade de usinas de biogás.....	211
Figura 11.4:	Critérios de eleição do local da usina.....	212
Figura 12.1:	Opções de uso da biomassa para disponibilizar energia final/útil.....	219
Figura 12.2:	Emissões de gases do efeito estufa (kg CO _{2eq} /kWh _{el}) de usinas-modelo de biogás em comparação com a matriz elétrica alemã	220
Figura 12.3:	Evolução das usinas de biogás na Alemanha até 2009	222
Figura 12.4:	Potência elétrica instalada relativa à área cultivada [kW _{el} /1.000 ha de área cultivada] nos Estados alemães	223
Figura 12.5:	Uso de substrato em usinas de biogás, valores baseados em massa (pesquisa entre operadores de usinas em 2009)	224
Figura 12.6:	Uso de substrato de culturas energéticas em usinas de biogás, valores baseados em massa (pesquisa entre operadores de usinas em 2009)	224
Figura 12.7:	Potencial técnico de energia primária para biogás na Alemanha 2007 e 2020.....	226

Lista de Tabelas



Tabela 2.1:	Concentrações adequadas de micronutrientes conforme diferentes fontes bibliográficas.....	24
Tabela 2.2:	Inibidores e sua concentração tóxica em processos de digestão anaeróbia	25
Tabela 2.3:	Produção de biogás específica e teor de metano dos respectivos grupos de substâncias	28
Tabela 2.4:	Valores característicos para silagem de gramíneas.....	28
Tabela 2.5:	Rendimento de biogás e metano da silagem de gramíneas.....	28
Tabela 2.6:	Composição média do biogás	29
Tabela 3.1:	Classificação das técnicas de geração de biogás conforme diferentes critérios.....	31
Tabela 3.2:	Armazenamento do substrato antes da fermentação	36
Tabela 3.3:	Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de trituração em unidades combinadas de dosagem e alimentação	37
Tabela 3.4:	Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de fragmentação externos.....	38
Tabela 3.5:	Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de fragmentação no tanque de carga.....	38
Tabela 3.6:	Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de fragmentação na linha de transporte.....	39
Tabela 3.7:	Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de fragmentação com função de transporte integrada	40
Tabela 3.8:	Valores característicos e parâmetros operacionais de tanques de higienização.....	41
Tabela 3.9:	Valores característicos e parâmetros operacionais de bombas centrífugas	43
Tabela 3.10:	Valores característicos e parâmetros operacionais de bombas de cavidade progressiva	44
Tabela 3.11:	Valores característicos e parâmetros operacionais da bomba de lóbulos.....	45
Tabela 3.12:	Valores característicos e parâmetros operacionais dos tanques de carga	46
Tabela 3.13:	Características de bombas dotadas de tremonha para a introdução de sólidos em fluxos líquidos.....	48
Tabela 3.14:	Valores característicos e parâmetros operacionais de pistões de alimentação	49
Tabela 3.15:	Valores característicos e parâmetros operacionais de transportadores helicoidais de alimentação	50
Tabela 3.16:	Valores característicos de guarnições e tubulações de líquidos.....	51
Tabela 3.17:	Valores característicos de guarnições e tubulações de gases	51
Tabela 3.18:	Características de biorreatores com mistura completa	52
Tabela 3.19:	Características de biorreatores com técnica do fluxo pistonado.....	53
Tabela 3.20:	Valores característicos e parâmetros operacionais de concreto para reservatórios em usinas de biogás.....	58
Tabela 3.21:	Valores característicos e parâmetros operacionais do aço inoxidável para reservatórios em usinas de biogás.....	58
Tabela 3.22:	Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de hélice acionados por motor submersível	60
Tabela 3.23:	Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de eixo longo	61
Tabela 3.24:	Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores axiais para usinas de biogás	62

Tabela 3.25:	Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de pás e de carretel em biodigestores verticais e horizontais.....	63
Tabela 3.26:	Valores característicos e parâmetros operacionais da mistura pneumática do digestor.....	64
Tabela 3.27:	Valores característicos e parâmetros operacionais da agitação hidráulica do biodigestor.....	64
Tabela 3.28:	Especificações dos sistemas de remoção de sedimentos.....	65
Tabela 3.29:	Especificações dos separadores de rosca.....	66
Tabela 3.30:	Valores característicos de isolantes.....	66
Tabela 3.31:	Valores característicos de isolantes – Exemplos.....	67
Tabela 3.32:	Valores característicos e parâmetros operacionais de sistemas de aquecimento integrados.....	67
Tabela 3.33:	Valores característicos e parâmetros operacionais de trocadores de calor externos.....	68
Tabela 3.34:	Valores característicos e parâmetros operacionais de cúpulas de lona.....	69
Tabela 3.35:	Valores característicos e parâmetros operacionais de gasômetros de biogás externos.....	70
Tabela 3.36:	Valores característicos e parâmetros operacionais de flares.....	71
Tabela 4.1:	Teores de nutrientes de adubos orgânicos.....	75
Tabela 4.2:	Produção e rendimento de metano a partir de adubos orgânicos.....	75
Tabela 4.3:	Propriedades de biomassas dedicadas selecionadas.....	77
Tabela 4.4:	Produções de gás de biomassas dedicadas selecionadas.....	77
Tabela 4.5:	Produção de biogás padrão de subprodutos de origem vegetal, conforme a lista positiva da EEG 2009.....	78
Tabela 4.6:	Propriedades de subprodutos vegetais selecionados.....	79
Tabela 4.7:	Produções de substratos selecionados da agroindústria.....	81
Tabela 4.8:	Propriedades dos resíduos verdes.....	82
Tabela 4.9:	Resumo das propriedades dos substratos.....	84
Tabela 5.1:	Limites máximos permitidos da concentração de ácidos.....	89
Tabela 5.2:	Valores de referência de micronutrientes.....	91
Tabela 5.3:	Concentrações inibitórias de amônia citadas na literatura.....	92
Tabela 5.4:	Parâmetro de medição e disponibilidade.....	93
Tabela 5.5:	Métodos para realizar o controle.....	97
Tabela 5.6:	Programa de medição para usinas de biogás para a monitoração do processo biológico (modo de operação normal).....	99
Tabela 5.7:	Propriedades dos gases.....	106
Tabela 5.8:	Propriedades dos componentes do biogás.....	107
Tabela 5.9:	Efeito tóxico do sulfeto de hidrogênio.....	108
Tabela 6.1:	Processos de dessulfurização.....	116
Tabela 6.2:	Valores característicos e parâmetros operacionais da biodessulfurização no biodigestor.....	116
Tabela 6.3:	Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos externos de biodessulfurização.....	118
Tabela 6.4:	Valores característicos e parâmetros operacionais da lavagem bioquímica externa de gás.....	119
Tabela 6.5:	Valores característicos da dessulfurização química interna.....	119
Tabela 6.6:	Valores característicos da dessulfurização com carvão ativado.....	120
Tabela 6.7:	Comparação entre os métodos de purificação do metano.....	121
Tabela 6.8:	Valores característicos e parâmetros operacionais de motores a gás do ciclo Otto.....	126
Tabela 6.9:	Valores característicos e parâmetros operacionais de motores com ignição a compressão.....	126
Tabela 6.10:	Limites de emissões da TA Luft de 30.07.2002 para motores de combustão conforme N° 1.4 (inclusive 1.1 e 1.2), 4º Regulamento Alemão de Proteção contra Emissões.....	127
Tabela 7.1:	Taxas de remuneração para usinas de biogás inauguradas em 2011.....	147
Tabela 7.2:	Produção de biogás padrão de subprodutos de origem vegetal, conforme a lista positiva da EEG (seleção).....	151

Tabela 8.1:	Visão geral e caracterização das usinas-modelo	162
Tabela 8.2:	Parâmetros e custos dos substratos.....	162
Tabela 8.3:	Substratos utilizados em usinas-modelo [t MF/a].....	163
Tabela 8.4:	Dados técnicos característicos assumidos para processos e dimensionamento das usinas.....	164
Tabela 8.5:	Tecnologias das usinas-modelo	165
Tabela 8.6:	Valores característicos técnicos e de processos das usinas-modelo I a V	166
Tabela 8.7:	Dados característicos técnicos e de processos das usinas-modelo VI a IX	166
Tabela 8.8:	Dados característicos técnicos e de processos da usina-modelo X	167
Tabela 8.9:	Investimentos para unidades funcionais das usinas-modelo I a V	167
Tabela 8.10:	Investimentos para unidades funcionais das usinas-modelo VI a X.....	168
Tabela 8.11:	Direito à remuneração das usinas-modelo inauguradas em 2011	169
Tabela 8.12:	Análise do custo/benefício das usinas-modelo I a V	170
Tabela 8.13:	Análise custo/benefício para as usinas-modelo VI a IX	172
Tabela 8.14:	Cálculo de custos da usina-modelo X.....	173
Tabela 8.15:	Análise de sensibilidade das usinas-modelo I a V	174
Tabela 8.16:	Análise de sensibilidade para as usinas-modelo VI a IX	174
Tabela 8.17:	Análise custo/benefício da secagem de cereais pelas fontes de calor biogás ou óleo de aquecimento	175
Tabela 8.18:	Análise custo/benefício do processo de secagem de cereais com calor residual do biogás de cogeração, sem considerar o bônus de cogeração	176
Tabela 8.19:	Análise custo/benefício do processo de secagem de cereais com calor residual do biogás de cogeração, considerando o bônus de cogeração	177
Tabela 8.20:	Economia de óleo de aquecimento em processos de secagem de cereais com calor residual do biogás	177
Tabela 8.21:	Demanda anual de calor de estufas, com diferentes regimes de cultivo e dimensões, e aproveitamento do calor residual de uma usina de biogás de 500 kW _{el}	179
Tabela 8.22:	Comparação de custos do fornecimento de calor por meio do aquecimento a óleo e calor residual de usina de biogás/cogeração a exemplo de duas dimensões de estufas em regime de cultivo "frio"	179
Tabela 8.23:	Valores hipotéticos e característicos para o fornecimento de calor em uma rede local municipal de calor, com cobertura básica pelo calor de usinas de biogás/cogeração e forno de queima de cavacos	179
Tabela 8.24:	Demanda de investimentos e custos de fornecimento de calor para a rede municipal de calor em dependência do preço de venda do calor da usina de biogás/cogeração	180
Tabela 8.25:	Classificação qualitativa dos diferentes canais de utilização do calor.....	180
Tabela 9.1:	Condições básicas a observar no planejamento de substrato.....	183
Tabela 9.2:	Terra exigida, imobilização de capital e tempo de trabalho necessário de diferentes atividades	186
Tabela 9.3:	Sequência de trabalho e tempo de trabalho exigido no processo de silagem do milho.....	188
Tabela 9.4:	Sequência de trabalho e tempo de trabalho exigido no processo de cereais	188
Tabela 9.5:	Tempo de trabalho necessário para a supervisão de usinas de biogás.....	189
Tabela 9.6:	Tempos de carregamento conforme o equipamento de carregamento utilizado	190
Tabela 9.7:	Cálculo do tempo de trabalho necessário/ano para o preparo e carregamento do substrato (com tempo de troca de ferramenta/preparação) para a usina-modelo III	191
Tabela 10.1:	Comparação dos valores característicos e propriedades de enriquecimento de biofertilizantes e adubo orgânico.....	194
Tabela 10.2:	Comparação das concentrações de metais pesados de biofertilizantes e adubos orgânicos.....	195
Tabela 10.3:	Patógenos nos dejetos líquidos e resíduos orgânicos	195
Tabela 10.4:	Ocorrência de salmonelas em substratos e biofertilizantes de usinas de biogás	195
Tabela 10.5:	Coberturas para depósitos de biofertilizantes para a redução de emissões de amônia.....	196

Tabela 10.6:	Potencial de gás residual de biofertilizantes de usinas de biogás agrícolas, com base no rendimento de metano por t de substrato carregado; valores médios, mínimos e máximos obtidos de 64 usinas de biogás (Programa de Medição de Biogás II)	197
Tabela 10.7:	Pontos de equilíbrio econômico de reservatórios circulares de biofertilizantes modernizados com cobertura impermeável: Potência elétrica mínima instalada em que, para investimentos em modernização diferentes, atinge-se no mínimo uma cobertura dos custos	199
Tabela 10.8:	Perdas cumulativas de amônia após a deposição de adubos orgânicos com espalhadores, sem incorporação ao solo, em diferentes temperaturas, dentro de 48 horas	200
Tabela 10.9:	Redução das perdas de amônia após a deposição de biofertilizantes líquidos	202
Tabela 10.10:	Teores de nutrientes das frações, calculados para os processos de tratamento por meio de modelos matemáticos.....	206
Tabela 10.11:	Avaliação dos processos para o tratamento de biofertilizantes	206
Checklists:		
1ª etapa:	Elaboração do esboço do projeto	210
2ª etapa:	Elaboração do estudo de viabilidade	211
3ª etapa:	Disponibilidade de substrato	212
4ª etapa:	Seleção do local.....	213
5ª etapa:	Logística do fluxo de materiais	214
6ª etapa:	Seleção da tecnologia.....	215
7ª etapa:	Utilização de gás.....	215
8ª etapa:	Avaliação e tomada de decisão	216
Tabela 12.1:	Distribuição regional das usinas de biogás em operação no ano de 2009 e potência elétrica instalada na Alemanha (pesquisa das instituições dos Estados em 2010)	222

Índice de Autores

Nome	Instituição
Thomas Amon	Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)
Hartwig von Bredow	Escritório de advocacia Schnutenhaus & Kollegen
Jaqueline Daniel-Gromke	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Helmut Döhler	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Elmar Fischer	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Erik Fischer	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Jörg Friehe	Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Henrik Gattermann	Anteriormente: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)
Sven Grebe	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Johan Grope	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Stefan Hartmann	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Peter Jäger	Anteriormente: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Uwe Jung	Anteriormente: Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Martin Kaltschmitt	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Ulrich Keymer	Bayrische Landesanstalt für Landtechnik (LfL)
Susanne Klages	Anteriormente: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Jan Liebetrau	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Anke Niebaum	Anteriormente: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Jan Postel	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Gerd Reinhold	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)
Ursula Roth	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Alexander Schattauer	Anteriormente: Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Anne Scheuermann	Anteriormente: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)
Frank Scholwin	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Andre Schreiber	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Britt Schumacher	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Markus Schwab	Anteriormente: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Ralf Stephany	PARTA Buchstelle für Landwirtschaft und Gartenbau GmbH
Thomas Weidele	Anteriormente: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)
Peter Weiland	Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Marco Weithäuser	Anteriormente: Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Ronny Wilfert	Anteriormente: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)
Bernd Wirth	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Sebastian Wulf	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Os endereços das instituições se encontram na página 233.



1 Finalidade deste Guia

Em virtude da escalada contínua de preços da energia em nível global, a recuperação de energia de resíduos orgânicos e fluxos de resíduos vem se tornando uma alternativa cada vez mais atraente. Além da geração de energia renovável passível de ser armazenada, a produção distribuída de biogás pode não apenas fomentar o desenvolvimento de regiões rurais, mas também fortalecer pequenas e médias empresas. A produção e uso de biogás expandiu-se rapidamente nos últimos anos graças à legislação em favor das energias renováveis, em vigor na Alemanha desde o ano de 2000. Em 2010, o país já contava com mais de 5.900 usinas de biogás, a maioria servindo a atividades agrícolas. O período também testemunhou a evolução e o aperfeiçoamento significativo das tecnologias utilizadas. Agora, a farta experiência da Alemanha em tecnologia de biogás vem sendo cada vez mais cobiçada internacionalmente.

A finalidade deste guia prático, portanto, é contribuir no sentido de oferecer respostas detalhadas e embasadas na prática às perguntas relacionadas à geração de biogás para a agricultura no que toca à tecnologia, organização, legislação e aspectos econômicos.

Elaborada pela Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. – FNR, entidade alemã que fomenta projetos no setor de energias renováveis, esta valiosa obra de referência contém textos de autores selecionados que versam sobre tecnologia de biogás, planejamento de custos e operação de usinas. Visando atender às necessidades dos leitores situados fora da Alemanha, a obra foi adaptado e traduzido com base nos projetos de biogás realizados pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e financiados pelo Ministério de Cooperação Econômica e Desenvolvimento da Alemanha (BMZ). Ele apresenta o estado da arte em tecnologia de biogás para a geração eficiente de energia, gás, calor e frio, e fornece ao usuário subsídios para tomar decisões contextualizadas e com

competência no que diz respeito ao tema biogás. Desta maneira, o guia não apenas descreve os padrões tecnológicos, mas demonstra formas como uma tecnologia adaptada pode ser planejada e selecionada para atender às exigências de um determinado contexto.

1.1 Objetivo

O crescimento do setor de geração de energia a partir do biogás na Alemanha se deve principalmente ao atual quadro administrativo, particularmente às tarifas de energia originada de fontes renováveis, como previsto na Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG). Isto originou uma demanda contínua e elevada, que levou à criação de um número considerável de fabricantes de usinas de biogás e fornecedores de componentes, possibilitando que a Alemanha se tornasse um líder no ramo de planejamento e construção de usinas desse tipo.

Em qualquer país, a realização de um projeto de biogás está condicionada a quatro questões fundamentais, abordadas neste guia prático:

- O sucesso de um projeto de biogás pressupõe que os agricultores, os investidores e as futuras operadoras tenham um conhecimento profundo e multidisciplinar, aliado ao know-how sobre agricultura e tecnologia energética, abrangendo todos os aspectos relacionados da legislação, administração, organização e logística.
- O mercado oferece uma variedade incrível de opções técnicas e soluções personalizadas. Este guia mostra um panorama cientificamente embasado e imparcial das tecnologias atualmente disponíveis no mercado que oferecem grande potencial para o futuro.
- A escolha do substrato adequado deve estar em conformidade com os princípios da biotecnologia. Assim, este guia disponibiliza o conhecimento ne-



cessário para garantir a melhor operação possível de uma usina de biogás, especialmente nas fases de projeto e operação.

- Particularmente em novos mercados, o processo de licenciamento da usina é uma etapa frequentemente subestimada no caminho de concretização do projeto. O guia fornece uma visão geral dos diversos passos envolvidos na realização de um projeto de biogás, considerando as diferenças do processo de licenciamento nos diversos países.

Idealmente, o fornecimento de energia renovável a partir do biogás pode ser combinado com o aprimoramento do fluxo de materiais, o que frequentemente justifica o investimento em uma usina. Para chegar a uma decisão bem embasada, porém, os investidores com a intenção de operar uma usina de biogás devem aplicar a metodologia correta ao comparar as suas próprias ideias com as possibilidades oferecidas pela tecnologia de biogás. Por esta razão, o Guia Prático do Biogás fornece as informações necessárias para esgotar todo o potencial do setor de biogás em termos de eficiência energética e lucratividade.

1.2 Abordagem

Este guia foi concebido para preencher eventuais lacunas no conhecimento e guiar empresas operadoras de usinas e demais envolvidos ao longo das várias fases de planejamento de um projeto de biogás, até a sua execução.

O guia pretende **ESTIMULAR** o leitor a identificar as oportunidades oferecidas em sua região e examinar se pode contribuir para o aproveitamento do potencial energético do biogás e de que forma. Este guia também pretende **INFORMAR**. Para isto, oferece às futuras operadoras de usinas e demais interessados em utilizar o potencial energético do biogás todas as informações necessárias em uma fonte única. O guia também apresenta meios apropriados para **AVALIAR** o conceito de um projeto, fornecendo as ferramentas necessárias para examinar, de forma crítica, os conceitos de projetos promissores e sua viabilidade econômica. Por fim, o guia também pretende capacitar o leitor com conhecimento e auxiliá-lo na tomada de decisões a fim de **CONCRETIZAR** um projeto para o fornecimento de energia a partir do biogás.

1.3 Conteúdo

O Guia Prático do Biogás dá ao leitor um panorama da complexidade da produção e uso do biogás, servindo como fonte de consulta e roteiro em todas as considerações e ações necessárias para a preparação, planejamento, construção e operação de uma usina de biogás. O guia leva em consideração não apenas os aspectos tecnológicos e de engenharia, mas também fatores legais, econômicos e organizacionais. Estes temas são tratados com profundidade em cada um dos capítulos e são apresentados resumidamente a seguir. Com base nas quatro abordagens descritas acima, esta obra foi concebida para oferecer apoio principalmente nas seguintes frentes:

- estímulo ao envolvimento
- disseminação de informações básicas
- avaliação do conceito de um projeto
- concretização do projeto.

Os capítulos 2 a 6 e 10 explicam os princípios de construção e operação de uma usina de biogás e descrevem o uso de substratos e resíduos. Os capítulos 7 a 9 discorrem sobre o contexto legal, administrativo e econômico em que operam as usinas de biogás e como elas são estruturadas. O capítulo 11 serve de apoio na implementação de um projeto de usina de biogás e, com base nas informações contidas nos capítulos precedentes, apresenta ao leitor recomendações e checklists para a construção, operação e contratações da usina. O capítulo 12 se propõe a motivar a elaboração de conceitos e lançar iniciativas. Ele também apresenta argumentos em favor da produção e uso de biogás como forma de apoiar campanhas de relações públicas, cujo papel é fundamental na realização de um projeto de recuperação de energia de substratos orgânicos para a produção de biogás.

1.4 Público-alvo

O guia é dirigido a todos os interessados na produção e uso do biogás e àqueles de alguma forma envolvidos em um projeto de biogás. A publicação, portanto, é voltada primariamente para as pessoas e instituições empenhadas na realização desse tipo de projeto. O público-alvo inclui agricultores, empresas do ramo agrícola e seus parceiros. Na qualidade de produtores de substrato e energia, eles têm um potencial interesse na recuperação e uso da energia do biogás. Além disso, os resíduos de uma usina de biogás têm alta

qualidade e podem ser utilizados como adubos agrícolas.

O público-alvo inclui também geradores e recicladores de resíduos orgânicos, tais como empresas de disposição de resíduos e prefeituras. Investidores institucionais e privados bem como empresas de utilidade pública do ramo de energia também figuram entre os potenciais realizadores de projetos de biogás. Exemplo são as empresas de capital de risco que investem especificamente em projetos desse tipo.

O segundo público-alvo consiste em pessoas que, de uma forma ou de outra, estão envolvidas em um projeto de biogás, abrangendo não somente os funcionários de órgãos governamentais, empregados de bancos, funcionários de empresas geradoras e distribuidoras de eletricidade e companhias de gás, prestadores de consultoria agrícola e planejadores, mas também fabricantes de usinas e fornecedores de componentes.

Este guia também é dirigido a qualquer pessoa envolvida direta ou indiretamente em um projeto de biogás, tendo sido elaborado para preencher eventuais lacunas no conhecimento e contribuir para a melhor compreensão dos interesses mútuos.

O guia também pretende servir de motivação e apoio para os tomadores de decisão que, em virtude de sua posição, se encontram na situação de iniciar e implementar um projeto de aproveitamento energético de biogás. A publicação será um auxílio para potenciais instituições de fomento e agências de energia em seu papel multiplicador.

1.5 Definição do escopo

Esta versão do guia prático é uma adaptação da versão alemã elaborada pela Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. com vistas a atender às necessidades do leitor localizado fora da Alemanha. Omitiu-se o conteúdo específico à situação da Alemanha e acrescentaram-se formulações e abordagens de relevância internacional. Por conseguinte, nem todos os tópicos de importância para as economias emergentes e os países em desenvolvimento foram abordados com profundidade. Destarte, foi dada ênfase na apresentação da tecnologia necessária para a produção eficiente de biogás, a qual pode ser comparada com as tecnologias existentes em cada país.

1.5.1 Tecnologia

Este guia enfoca exclusivamente a utilização da biomassa para a produção e uso do biogás, destacando particularmente as usinas no setor agrícola, bem como as aplicações dedicadas à utilização de resíduos gerados no processamento de produtos agrícolas. O guia não aborda, por exemplo, a utilização de resíduos urbanos e lodos de estações de tratamento de efluentes. Além disso, ele trata das tecnologias de biogás de eficácia comprovada no mercado e utilizadas em escala comercial na Alemanha.

No que toca à utilização do biogás, deu-se ênfase à cogeração de eletricidade e calor (CHP). Os sistemas domésticos de menor porte para utilização de gás no local não são tratados nesta publicação, uma vez que empregam uma tecnologia diferente que disponibiliza a energia com o menor capital possível. A obra discute a purificação do biogás aos níveis de qualidade do gás natural para a posterior injeção nas redes de gás e traz referências a outras publicações contendo análises e avaliações detalhadas a respeito.

Além da tecnologia de CHP baseada em motores, há outras tecnologias que também fazem uso do biogás, tais como microturbinas a gás, as células de combustível e o uso do gás para suprir a demanda local de combustível. Essas tecnologias são discutidas na medida em que houver estudos científicos comprovando a viabilidade econômica da sua aplicação em um futuro próximo. O guia, portanto, dedica especial atenção à geração de biogás por meio de processos disponíveis em escala comercial e à combustão do biogás em motores visando a produção de energia elétrica com tecnologia disponível no mercado.

1.5.2 Substratos

O guia considerou os substratos de maior importância atualmente utilizados no setor de biogás na Alemanha, qualquer que seja a sua origem – agricultura, poda, prefeituras, indústrias que utilizam matéria-prima de origem vegetal – uma vez que a maior parte dos dados empíricos foi obtida a partir de tais substratos. A publicação dá destaque aos substratos agrícolas e do ramo alimentício, uma vez que os mercados de biogás, especialmente os incipientes, se servirão inicialmente das biomassas disponíveis antes que o uso de outros substratos se popularize. Evidentemente, os princípios aqui descritos também podem ser aplicados a outros substratos, desde que conhecida a forma como se dá a sua digestão.



1.5.3 Atualidade dos dados

A elaboração deste guia de produção e uso do biogás foi baseada em trabalho de base realizado em 2008 e 2009 e dados coletados neste período. Assim, ele descreve o estado da arte em usinas de biogás em meados de 2009. A discussão da legislação, por exemplo, faz referência à Lei Alemã de Energias Renováveis, de 2009, sujeita a emendas regulares e alinhada com a situação do mercado (emenda mais recente em 1º de janeiro de 2012). No contexto internacional, esta lei é um exemplo de como é possível estabelecer com êxito um mercado de biogás. As diferentes circunstâncias e contextos podem exigir a implementação de diferentes medidas a fim de atingir resultados positivos.

1.5.4 Escopo dos dados

Além dos fatos e dados importantes para a compreensão das informações e procedimentos relevantes, o guia também contém os dados necessários para realizar cálculos e estimativas iniciais. Outros dados foram omitidos em prol da clareza e transparência.

O Guia Prático do Biogás é o produto de pesquisas cuidadosamente realizadas e inúmeras consultas com especialistas. Ainda que não se pretenda que os dados sejam absolutamente completos e precisos, acreditamos ter cumprido o objetivo de apresentar, com abrangência e profundidade, as áreas fundamentais da produção e utilização de biogás.

2

Fundamentos da Fermentação Anaeróbica

2.1 Origem do biogás

Como já indica o nome, o "bio" gás tem origem em um processo biológico. A matéria orgânica, quando decomposta em meio anaeróbico (ausência de oxigênio), origina uma mistura gasosa chamada de biogás. Esse processo é muito comum na natureza e ocorre, por exemplo, em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no rúmen de animais ruminantes. Por meio de diversos microrganismos, a matéria orgânica é convertida em biogás quase por completo. Além disso, são produzidas certas quantidades de energia (calor) e nova biomassa.

A mistura gasosa formada é composta principalmente de metano (50% - 75% em volume) e dióxido de carbono (25% - 50% em volume). O biogás contém ainda pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros gases traço. A sua composição é influenciada principalmente pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção de usinas [2-1], [2-2], [2-3], [2-4]. O processo de formação do biogás se divide em várias etapas (ver figura 2.1). Os estágios de decomposição têm de estar perfeitamente coordenados entre si para que todo o processo se realize adequadamente.

O primeiro estágio é a **hidrólise**, em que compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios, são decompostos em substâncias menos complexas como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. No processo atuam bactérias hidrolíticas, cujas enzimas liberadas decompõem o material por meio de reações bioquímicas.

Por meio de bactérias fermentativas acidogênicas, os compostos intermediários formados são então decompostos em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos acético, propiônico e butírico), dióxido de carbono e hidrogênio na chamada **fase acidogênica** (acidogênese). Adicionalmente, formam-se também pequenas

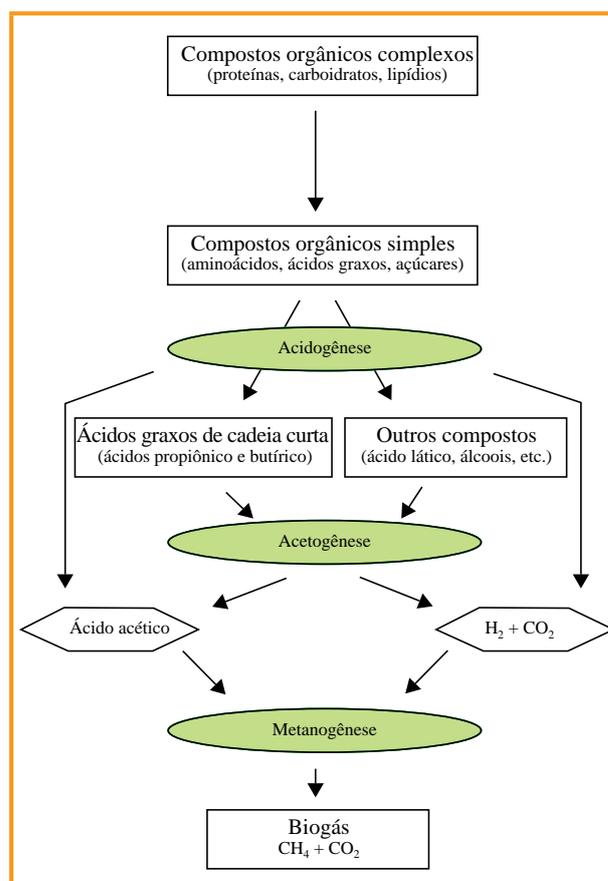


Figura 2.1: Esquema da decomposição anaeróbica

quantidades de ácido láctico e álcoois. Os tipos de compostos formados nesse estágio dependem da concentração do hidrogênio intermediário.

Na acetogênese, o processo de **formação de ácido acético**, esses compostos são convertidos por bactérias acetogênicas em precursores do biogás (ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono). Nesse ponto, a pressão parcial do hidrogênio é decisiva. Por razões de cunho energético, uma concentração de hidrogênio muito elevada impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese. A consequência é o acúmulo de ácidos orgânicos que inibem a metanogênese,

tais como o ácido propiônico, ácido isobutírico, ácido isovalérico e ácido capróico. Por essa razão, as bactérias acetogênicas (produtoras de hidrogênio) têm de estar estreitamente associadas a arqueas metanogênicas. Durante a formação do metano, as arqueas consomem hidrogênio e dióxido de carbono (transferência interespecífica de hidrogênio), garantindo o meio propício para as bactérias acetogênicas [2-5].

No último estágio da formação do biogás, a **metanogênese**, as arqueas metanogênicas estritamente anaeróbias convertem principalmente o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano. Os metanógenos hidrogenotróficos produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, e os metanógenos acetoclásticos a partir da redução de ácido acético. Conforme as condições predominantes em usinas de biogás agrícolas, a formação de metano para cargas orgânicas volumétricas mais elevadas se dá pela via bioquímica que utiliza o hidrogênio, sendo que a metanogênese pela redução do ácido acético ocorre apenas para cargas orgânicas volumétricas relativamente baixas [2-7], [2-8]. Conforme a experiência com digestão de lodo, 70% do metano produzido se deve à redução do ácido acético e apenas 30% ao aproveitamento do hidrogênio. No caso de usinas de biogás agrícolas, porém, esses valores se aplicam somente a fermentadores de elevada carga com tempos de retenção breves [2-7], [2-9]. Recentes estudos apresentaram evidências de que a transferência interespecífica de hidrogênio determina a taxa de formação do metano [2-10].

De modo geral, as quatro fases da decomposição anaeróbia ocorrem paralelamente em um processo de um único estágio. No entanto, uma vez que as bactérias têm exigências diferentes quanto ao seu habitat, tais como o pH e a temperatura, deve ser definido um meio termo em relação à tecnologia do processo. Como os microrganismos metanogênicos são o elo mais fraco da biocenose e os mais sensíveis a distúrbios, em virtude de sua baixa taxa de crescimento, as condições do meio têm de ser adaptadas às suas necessidades. Na prática, porém, qualquer tentativa de isolar a hidrólise e a acidogênese da metanogênese por meio de dois estágios de processo distintos (sistema de duas fases) tem êxito limitado, pois, apesar do baixo pH na fase de hidrólise ($\text{pH} < 6,5$), ocorre formação parcial de metano. Por isso, além do dióxido de carbono e do hidrogênio, o gás de hidrólise contém também metano e, portanto, necessita ser consumido ou tratado a fim de evitar riscos à segurança e impactos negativos sobre o meio ambiente [2-11].

Dependendo da construção e operação da usina de biogás, bem como da natureza e concentração da matéria fresca utilizada como substrato, em processos de vários estágios é possível definir diferentes condições do meio em cada estágio da digestão. As condições do meio, por sua vez, influenciam a composição e atividade da biocenose microbiana e, com isso, têm influência direta nos produtos metabólicos originados.

2.2 Condições do meio

A descrição das condições do meio deve distinguir entre digestão úmida e digestão de sólidos (também denominada fermentação a seco), visto que os dois processos podem apresentar diferenças quanto ao teor de umidade, concentração de nutrientes e transporte de substâncias. Trataremos a seguir apenas da digestão úmida, uma vez que essa é a técnica predominante na prática.

Do ponto de vista biológico, não é adequado classificar estritamente os processos em digestão úmida ou seca, pois os microrganismos sempre necessitam de um meio líquido para o seu crescimento e sobrevivência.

A determinação do teor de matéria seca a partir da matéria fresca a ser digerida também tem gerado dúvidas, uma vez que não raro são utilizados diversos substratos com diferentes teores de matéria seca. O operador da usina tem de estar ciente de que o teor de matéria seca dos substratos separadamente não é o fator determinante para a classificação do processo, mas sim o teor de matéria seca da mistura de substratos com a qual o biodigestor é alimentado.

Por essa razão, a classificação do processo em digestão úmida ou seca deve se dar com base no conteúdo da massa seca no biodigestor. Vale lembrar que, em ambos os casos, os microrganismos necessitam estar em contato direto com a água em seu ambiente.

Apesar de não haver uma definição exata do limite entre a digestão úmida e a digestão seca, na prática considera-se que, no caso de cultivos energéticos, se o teor de matéria seca no biodigestor for igual ou inferior a 12%, a digestão é classificada como úmida, pois tal teor de umidade permite o bombeamento do conteúdo do biodigestor. Via de regra, o aumento de matéria seca acima de 15% a 16% no biodigestor inviabiliza o bombeamento do material, sendo o processo então denominado digestão seca.

2.2.1 Oxigênio

As arqueas metanogênicas estão entre os seres vivos mais antigos da Terra, tendo se originado entre 3 a 4 bilhões de anos atrás, uma época em que a atmosfera era muito diferente da que hoje conhecemos. Por isso, esses microrganismos precisam de um ambiente livre de oxigênio. Para a maioria das espécies de arqueas, uma quantidade pequena de oxigênio já é suficiente para impedir que sobrevivam. No entanto, é impossível evitar completamente que o oxigênio penetre no biodigestor. Mesmo sob essas condições, as arqueas metanogênicas não são inibidas nem cessam a sua atividade imediatamente. Isso se explica pelo fato de elas coexistirem com bactérias aeróbias oriundas das etapas de degradação precedentes [2-1], [2-2]. Algumas das espécies de bactérias, as denominadas bactérias anaeróbias facultativas, sobrevivem tanto em ambientes com oxigênio quanto em sua completa ausência. Desde que a entrada de oxigênio não seja excessivamente grande, essas bactérias o consomem antes que ele prejudique as arqueas metanogênicas, dependentes de um meio sem oxigênio. É por essa razão que o oxigênio do ar introduzido no gasômetro do biodigestor para a biodessulfurização não tem impacto negativo sobre a formação de metano [2-6].

2.2.2 Temperatura

De forma geral, quanto maior for a temperatura do meio, maior será a velocidade de uma reação química. Essa regra, porém, nem sempre se aplica aos processos biológicos de transformação e degradação, uma vez que cada microrganismo envolvido nos processos metabólicos tem a sua própria faixa de temperatura ideal [2-1]. A variação da temperatura acima ou abaixo dessa faixa ideal pode acarretar a inibição dos microrganismos, podendo levar até mesmo a danos irreversíveis.

Em função de sua temperatura ótima, os microrganismos envolvidos na degradação se dividem em psicrófilos, mesofílicos e termofílicos [2-13]:

- A temperatura ótima para o desenvolvimento dos microrganismos psicrófilos é abaixo de 25 °C. Embora dispense o aquecimento do substrato e do biodigestor, essa faixa de temperatura se caracteriza pela lenta decomposição e reduzida produção de gás, o que geralmente impossibilita a operação de usinas de biogás em escala comercial.
- A maioria dos microrganismos metanogênicos apresenta picos de crescimento em faixas mesofíli-

cas de temperatura entre 37 e 42 °C. Usinas operando nessa faixa são o tipo mais comum, pois tal faixa de temperatura permite rendimentos relativamente elevados de gás e proporciona uma boa estabilidade do processo [2-6].

- A fermentação com culturas termofílicas é adequada em processos que requerem o extermínio de germes nocivos pela higienização do substrato, ou que utilizam como matéria-prima substratos com temperaturas intrinsecamente elevadas (p. ex. águas residuárias). A faixa de temperatura ideal de tais culturas é de 50 a 60 °C. A temperatura mais elevada proporciona maior taxa de decomposição e torna o substrato menos viscoso. Em contrapartida, a manutenção dessa faixa de temperatura significa um gasto maior de energia no processo de digestão. Além disso, o processo de digestão nessa faixa de temperatura é mais suscetível a distúrbios e a variações do fluxo de alimentação de substrato ou do modo de operação do biodigestor, uma vez que existe um número menor de espécies de microrganismos metanogênicos em condições termofílicas [2-6].

Nesse contexto, a experiência mostra que não há limites rígidos entre as diferentes faixas de temperatura e variações bruscas de temperatura podem prejudicar os microrganismos. Por outro lado, os microrganismos metanogênicos têm a capacidade de se adaptar a diferentes níveis de temperatura quando a sua variação é lenta. Por isso, a estabilidade do processo depende muito mais da constância da temperatura do que do seu valor absoluto em si.

Nesse contexto, é digno de nota o efeito do autoaquecimento, comumente observado na prática. Esse efeito se dá com o uso de substratos não líquidos, ricos em carboidratos, armazenados em reservatórios bem isolados. O autoaquecimento é devido à produção de calor durante a decomposição do carboidrato por alguns grupos de microrganismos. Com isso, a operação originalmente na faixa mesofílica pode subir a temperaturas de até 43 a 48 °C. Na presença de intensivo monitoramento analítico associado à regulação de processo, podem ser toleradas variações de temperatura com reduções pequenas e momentâneas na produção de gás [2-12]. No entanto, sem as necessárias intervenções no processo, como a redução das quantidades de entrada, os microrganismos não são capazes de se adaptar à variação de temperatura, o que, no pior dos casos, pode levar à suspensão completa da produção de gás.

2.2.3 Valor do pH

A regra da temperatura vale também para o valor do pH. Os microrganismos envolvidos nos diversos estágios de decomposição necessitam de diferentes valores de pH para o seu desenvolvimento ótimo. No caso das bactérias hidrolíticas e acidogênicas, o pH ideal é de 5,2 a 6,3 [2-6]. Estas bactérias, porém, não dependem estritamente dessa faixa e são capazes de transformar o substrato mesmo na presença de valores de pH levemente elevados, sendo a sua atividade apenas ligeiramente diminuída. Já as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas, por outro lado, dependem inteiramente de um pH neutro entre 6,5 e 8 [2-8]. Portanto, processos de fermentação realizados em apenas um biodigestor devem respeitar essa faixa de pH.

Independentemente de o processo se realizar em um ou vários estágios, o valor do pH no sistema é determinado automaticamente pelos metabólitos ácidos e alcalinos produzidos na decomposição anaeróbia [2-1]. A estabilidade de tal equilíbrio é demonstrada pela seguinte reação em cadeia.

Se o processo for alimentado com uma quantidade muito grande de matéria orgânica em um breve período de tempo ou se a metanogênese por alguma razão for inibida, eleva-se a concentração dos metabólitos ácidos da acidogênese. Em situações normais, o valor do pH se neutraliza pelo efeito tampão do carbonato e da amônia. O valor do pH se reduz quando a capacidade de tamponamento do sistema se esgota, ou seja, quando ocorre um acúmulo muito grande de ácidos orgânicos. Isso, por sua vez, aumenta o efeito inibitório do sulfeto de hidrogênio e do ácido propiônico, o que em pouco tempo pode acarretar a parada do biodigestor. Por outro lado, o valor do pH pode se elevar caso a decomposição de compostos nitrogenados ocasiona a liberação de amônia, a qual reage com a água formando o amônio. Isso aumenta o efeito inibitório da amônia. No que toca ao controle do processo, porém, deve-se observar que, como o valor do pH se altera lentamente, o uso desse parâmetro para controlar o equipamento tem restrições, ainda que, em função de sua importância, ele tenha de ser medido continuamente.

2.2.4 Disponibilidade de nutrientes

Cada espécie de microrganismo envolvido na decomposição anaeróbia tem sua necessidade própria de vitaminas, micro e macronutrientes. A taxa de crescimento e a atividade das diversas populações estão

condicionadas à concentração e a disponibilidade desses nutrientes. Os limites máximo e mínimo de concentração típicos de cada espécie são difíceis de definir, uma vez que existe uma grande diversidade de culturas, em parte caracterizadas por uma excepcional capacidade adaptativa. A fim de que se produza o máximo de metano do substrato utilizado, a disponibilidade dos nutrientes para os microrganismos deve ser mantida em níveis ótimos. A quantidade de metano que pode ser obtida do substrato é determinada pelo seu teor de proteínas, gorduras e carboidratos. Esses fatores influenciam igualmente a necessidade específica de nutrientes [2-18].

A proporção adequada entre macro e micronutrientes é um pré-requisito para a estabilidade do processo. Após o carbono, o nitrogênio é o nutriente mais importante, sendo necessário para a formação de enzimas responsáveis pela realização do metabolismo. Por isso, é importante que o substrato tenha a relação C/N correta. Uma relação C/N muito elevada (muito carbono e pouco nitrogênio) reduz a atividade metabólica. Como consequência, o carbono não é completamente degradado e o rendimento de metano não atinge o seu pico máximo. Inversamente, a abundância de nitrogênio pode causar a formação excessiva de amônia (NH_3), capaz de inibir o crescimento das bactérias mesmo em baixas concentrações, podendo até ocasionar o colapso de toda a população de microrganismos [2-2]. Por isso, para que o processo transcorra adequadamente, a relação C/N deve estar na faixa de 10 a 30. Além do carbono e do nitrogênio, o fósforo e o enxofre são nutrientes igualmente essenciais. Os aminoácidos têm em sua composição o enxofre, e os compostos de fósforo são fundamentais para a formação da ATP (adenosina trifosfato) e da NADP (nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato), responsáveis pelo transporte de energia. Para que a dose de nutrientes para os microrganismos seja adequada e suficiente, a relação C:N:P:S no reator deve ser de 600:15:5:3 [2-14].

Além dos macronutrientes, a disponibilidade de micronutrientes é essencial para a sobrevivência dos microrganismos. A demanda de micronutrientes é geralmente atendida na maioria das usinas de biogás agrícolas, principalmente pelo uso de dejetos animais. Com muita frequência, porém, ocorre uma carência de microelementos, principalmente na digestão simples de cultivos energéticos. Arqueas metanogênicas necessitam de cobalto (Co), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e selênio (Se), e algumas espécies de arqueas exigem também o tungstênio (W). Ni, Co e Mo são cofatores em reações essenciais no metabolismo [2-15], [2-16].



Além disso, magnésio (Mg), ferro (Fe) e manganês (Mn) são micronutrientes importantes para o transporte de elétrons e a função de determinadas enzimas.

Por isso, a concentração dos micronutrientes no reator é um valor referencial de importância decisiva. Nesse contexto, se compararmos as diferentes fontes bibliográficas, é evidente a grande amplitude de variação dos micronutrientes considerados como essenciais, em certos casos chegando a 100.

Tabela 2.1: Concentrações adequadas de micronutrientes conforme diferentes fontes bibliográficas

Micro-nutriente	Faixa de concentração [mg/l]			
	conforme [2-18]	conforme [2-19]	conforme [2-16] ^a	conforme [2-17] ^b
Co	0,003-0,06	0,003-10	0,06	0,12
Ni	0,005-0,5	0,005-15	0,006	0,015
Se	0,08	0,08-0,2	0,008	0,018
Mo	0,005-0,05	0,005-0,2	0,05	0,15
Mn	N.E.	0,005-50	0,005-50	N.E.
Fe	1-10	0,1-10	1-10	N.E.

a. Concentração mínima absoluta em usinas de biogás
 b. Concentração ideal recomendada

As faixas de concentração indicadas na tabela 2.1 podem ser adotadas em usinas de biogás agrícolas apenas em parte, uma vez que os valores se baseiam em pesquisas realizadas na área de tratamento de efluentes em diferentes condições e utilizando diferentes métodos de levantamento. Além disso, a amplitude é extremamente alta e quase não existem dados sobre as condições dos processos apresentados (p. ex. carga orgânica volumétrica, tempo de retenção, etc.). No reator, os micronutrientes podem se combinar com fosfatos, sulfetos e carbonatos livres, formando ligações de baixa solubilidade, o que os torna indisponíveis para os microrganismos. Por essa razão, a análise da concentração dos micronutrientes na massa de fermentação não é suficiente para determinar com certeza a disponibilidade dos microelementos. Somente é determinada a concentração total. Assim, o processo deve ser alimentado com quantidades de micronutrientes maiores que as que seriam necessárias para meramente compensar uma concentração deficiente. A determinação da carência deve sempre considerar as concentrações dos micronutrientes em todos os substratos. A análise dos teores de micronutrientes em diferentes rações animais

revelou que pode haver grandes variações. Isso dificulta enormemente a determinação da dosagem ideal dos micronutrientes em carência.

Apesar disso, antes da adição de micronutrientes deve-se primeiro determinar o seu teor no biodigestor a fim de evitar a superdosagem. Isso pode fazer com que a concentração de metais pesados nos biofertilizantes exceda o limite permitido para o reaproveitamento na agricultura, inviabilizando o seu uso como adubo orgânico.

2.2.5 Inibidores

A inibição da produção de gás ou do processo pode ser ocasionada por diferentes fatores. Por um lado, ela pode ter razões de cunho técnico e operacional (ver capítulo 5.4, "Gestão de distúrbios"). Por outro lado, o andamento do processo pode ser retardado pela ação de substâncias inibidoras, que, em determinadas circunstâncias, são capazes de diminuir a taxa de degradação mesmo em baixas concentrações. Em concentrações tóxicas, podem até ocasionar a parada do processo de digestão. Deve-se diferenciar os inibidores que atingem o biodigestor pela adição de substrato daqueles originados como compostos intermediários em estágios da decomposição.

É importante observar que o carregamento excessivo de substrato no biodigestor também pode inibir o processo de digestão, uma vez que praticamente qualquer substância em elevadas concentrações em um substrato pode influenciar negativamente a atividade bacteriana. Isso se aplica principalmente a antibióticos, solventes, desinfetantes, herbicidas, sais e metais pesados, substâncias capazes de inibir o processo de digestão mesmo em pequenas quantidades. O aporte de antibióticos geralmente se dá pela adição de adubos orgânicos ou gorduras animais, sendo que o efeito inibidor varia bastante entre os diferentes antibióticos. Em concentrações muito elevadas, os micronutrientes essenciais também podem ser tóxicos para os microrganismos. Como os microrganismos conseguem se adaptar a esses nutrientes até certo ponto, é difícil determinar a concentração exata a partir da qual um nutriente é prejudicial [2-2]. Alguns inibidores também interagem com outras substâncias. Os metais pesados, por exemplo, são danosos ao processo de digestão somente quando diluídos. Eles são agregados pelo sulfeto de hidrogênio, composto também formado durante o processo de digestão, e precipitados na forma de sulfeto de baixa solubilidade. Como na prática o H₂S quase sempre é formado durante a fermentação metanogênica, a presença dos metais pesados geralmente

não perturba o processo [2-2]. Isso não se aplica a compostos de cobre, que devido às suas propriedades bactericidas são tóxicos mesmo em concentrações mínimas (40 - 50 mg/l). Em empresas agrícolas, esses compostos podem entrar no ciclo produtivo por meio, por exemplo, da desinfecção de patas de animais.

Durante a digestão, são originadas diversas substâncias que podem inibir o processo. Vale lembrar, contudo, que as bactérias se caracterizam por uma alta capacidade adaptativa e, portanto, não se pode considerar os limites como absolutos e válidos em qualquer situação. Principalmente a amônia livre (NH_3), não iônica, prejudica as bactérias mesmo em pequenas concentrações. A amônia livre se encontra em equilíbrio com a concentração de amônio (NH_4^+) (a amônia reage com a água formando o amônio e um íon OH^- e vice-versa). Portanto, se a concentração dos íons OH^- se elevar e tornar o pH muito alcalino, o equilíbrio se desloca e a concentração da amônia aumenta. A elevação do pH de 6,5 para 8, por exemplo, leva a um aumento de 30 x na concentração de amônia livre. O aumento da temperatura no biodigestor também desloca o equilíbrio em direção à amônia de efeito inibidor. O limiar de inibição de um sistema de digestão não adaptado a elevadas concentrações de nitrogênio se encontra na faixa de 80 a 250 mg/l NH_3 [2-2]. Dependendo do valor do pH e da temperatura de fermentação, isso corresponde a uma concentração de amônio entre 1,7 e 4 g/l. A experiência mostra que, na presença de uma concentração total de nitrogênio amoniacal entre 3 e 3,5 g/l, é esperado que o processo de formação do biogás seja inibido pelo nitrogênio [2-18].

Do processo de fermentação participa também o sulfeto de hidrogênio (H_2S), que na forma não dissociada em solução age como citotóxica, sendo capaz de inibir o processo de digestão já a partir de concentrações de 50 mg/l. À medida em que o pH se reduz, aumenta a fração de H_2S livre, agravando o risco de inibição. É possível reduzir o teor de H_2S por meio da sua precipitação com íons de ferro formando sulfeto. O H_2S reage também com outros metais pesados, ligando-se e precipitando sob a formação de íons sulfeto (S^{2-}) [2-2]. Como mencionado, porém, o enxofre também é um importante macronutriente que deve estar presente em concentração suficiente para a formação de enzimas, de forma que a precipitação muito acentuada do sulfeto pode provocar a inibição da metanogênese.

Dessa forma, o efeito inibitório das diferentes substâncias depende de diversos fatores e dificilmente podem-se determinar limites absolutos. A tabela 2.2. mostra algumas substâncias inibidoras.

Tabela 2.2: Inibidores e sua concentração tóxica em processos de digestão anaeróbia [2-14]

Inibidor	Concentração de inibição	Observação
Oxigênio	> 0,1 mg/l	Inibição das arqueas metanogênicas anaeróbias obrigatórias.
Sulfeto de hidrogênio	> 50 mg/l H_2S	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório.
Ácidos graxos voláteis	> 2.000 mg/l HAC (pH = 7,0)	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias
Nitrogênio amoniacal	> 3.500 mg/l NH_4^+ (pH = 7,0)	Quanto maiores o pH e a temperatura, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias
Metais pesados	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Só metais dissolvidos apresentam efeito inibidor. Descontaminação pela precipitação de sulfeto.
Desinfetantes antibióticos	N.E.	Efeito inibitório varia com o composto.

2.3 Parâmetros operacionais

2.3.1 Carga orgânica volumétrica e tempo de retenção no biodigestor

Geralmente, a construção de uma usina de biogás prioriza os aspectos econômicos. Na definição das dimensões do biodigestor, por exemplo, nem sempre se almeja obter o rendimento máximo de gás ou a decomposição completa da matéria orgânica presente no substrato. Se a decomposição total da matéria orgânica fosse o principal objetivo, isso exigiria tempos muito longos de retenção do substrato no biodigestor, o que é possível apenas com tanques de alta capacidade, uma vez que algumas substâncias se decompõem apenas depois de muito tempo, ou nem se decompõem. Portanto, deve-se procurar obter uma capacidade adequada de decomposição com um custo aceitável.

Nesse sentido, um importante parâmetro operacional é a carga orgânica volumétrica (COV), que indica quantos quilos de matéria orgânica seca (MOS) devem ser carregados no biodigestor por m^3 de volume de trabalho, por unidade de tempo [2-1]. A carga orgânica volumétrica é expressa em $\text{kg MOS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

$$COV = \frac{\dot{m} \cdot c}{V_R \cdot 100} \text{ [kg MOS m}^{-3} \text{ d}^{-1}]$$

Equação 2.1: Carga orgânica volumétrica COV
 (\dot{m} = quantidade introduzida de substrato por unidade de tempo [kg/d];
 c = concentração da matéria orgânica [% MOS];
 V_R = volume do reator [m^3])

A carga orgânica volumétrica pode ser indicada para cada estágio (reservatório impermeável a gases, isolado e aquecido), para todo o sistema (total dos volumes de trabalho de todos os estágios) e incluindo ou não a recirculação de material. A alteração dos valores de referência pode resultar em COVs bastante diversas para uma usina. Para que a comparação entre as COVs de diferentes usinas seja o mais representativa possível, esse parâmetro deve ser calculado preferencialmente para o sistema como um todo sem levar em conta a recirculação de material, ou seja, somente para o substrato fresco.

Outro parâmetro do dimensionamento do reservatório é o tempo de retenção hidráulica (TRH), que representa o tempo médio calculado que um substrato permanece no biodigestor até a sua saída [2-1]. Para obtê-lo, divide-se o volume do reator (V_R) pela quantidade de substrato introduzida diariamente (\dot{V}) [2-2]. O tempo de retenção hidráulica é expresso em dias.

$$TRH = \frac{V_R}{\dot{V}} \text{ [d]}$$

Equação 2.2: Tempo de retenção hidráulica
 (V_R = volume do reator [m^3]; \dot{V} = volume de substrato introduzido [m^3/d])

O tempo de retenção efetivo é diferente do resultado dessa fórmula, pois os diferentes componentes saem do biodigestor em momentos diferentes conforme algumas interações como, por exemplo, os níveis de agitação. A carga orgânica volumétrica está intimamente relacionada ao tempo de retenção hidráulica (figura 2.2).

Assumindo que a composição do substrato seja constante, quanto maior for a carga orgânica volumétrica, maior é a quantidade de substrato introduzido no biodigestor, o que reduz o tempo de retenção. Para manter o processo fermentativo, o tempo de retenção hidráulica deve ser ideal para que, na renovação contínua do conteúdo do reator, não seja lavada uma quantidade de microrganismos maior que aquela que

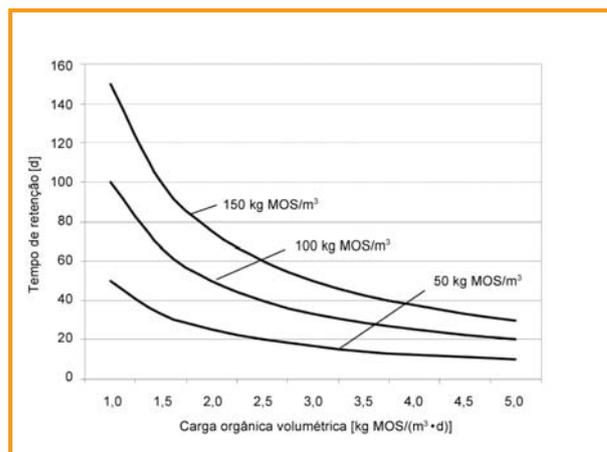


Figura 2.2: Relação entre a carga orgânica volumétrica e o tempo de retenção hidráulica para diferentes concentrações de substrato

cresce no mesmo período (algumas arqueas metanogênicas, p. ex., apresentam um tempo de duplicação de 10 ou mais dias) [2-1]. Considerar também que, se o tempo de retenção for curto, os microrganismos têm pouco tempo para decompor o substrato, resultando em um rendimento insuficiente de biogás. Portanto, é igualmente importante que o tempo de retenção seja compatível com a taxa de decomposição específica do substrato utilizado. Se a quantidade diária de adição de substrato for conhecida, pode-se calcular o volume do reator através da degradabilidade do substrato e do tempo de retenção pretendido.

Os parâmetros operacionais de uma usina de biogás permitem descrever o seu nível de carga, por exemplo, para comparar diferentes usinas. No controle da usina, esses parâmetros somente são úteis na fase de partida a fim de que se atinja uma elevação lenta e contínua da atividade. Geralmente, considera-se principalmente a carga orgânica volumétrica. O tempo de retenção tem maior importância em usinas que recebem elevadas quantidades de líquidos com baixos teores de matéria orgânica suscetível à decomposição (usinas alimentadas com esterco líquido).

2.3.2 Produtividade, rendimento e taxa de degradação

A produtividade ($P_{(CH_4)}$), rendimento ($A_{(CH_4)}$) e taxa de degradação (η_{MOS}) são parâmetros que se prestam muito bem para descrever o desempenho de uma usina de biogás. A produtividade é expressa pela produção de gás em relação ao volume do biodigestor. Ela é definida pelo cociente entre a produção diária de gás e o volume do reator, indicando portanto a eficiência [2-20]. A produtividade pode se referir tanto à

produção de biogás ($P_{(\text{biogás})}$) quanto à produção de metano ($P_{(\text{CH}_4)}$), sendo expressa em $\text{Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

$$P_{(\text{CH}_4)} = \frac{\dot{V}_{(\text{CH}_4)}}{V_R} \quad [\text{Nm}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}]$$

Equação 2.3: Produtividade de metano ($\dot{V}_{(\text{CH}_4)}$ = produção de metano [Nm^3/d]; V_R = volume do reator [m^3])

O rendimento expressa a produção de gás em relação à quantidade de substrato introduzida [2-8]. O rendimento pode se referir tanto à produção de biogás ($A_{(\text{biogás})}$) quanto à produção de metano ($A_{(\text{CH}_4)}$). Ele é determinado pelo cociente entre o volume de gás produzido e a quantidade de matéria orgânica introduzida, sendo expressa em $\text{Nm}^3/\text{t MOS}$.

O valor do rendimento reflete a eficiência da produção de biogás e metano a partir do substrato utilizado. Como parâmetro isolado, porém, ele é pouco

$$A_{(\text{CH}_4)} = \frac{\dot{V}_{(\text{CH}_4)}}{\dot{m}_{\text{MOS}}} \quad [\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1} \text{ MOS}]$$

Equação 2.4: Rendimento de metano ($\dot{V}_{(\text{CH}_4)}$ = produção de metano [Nm^3/d]; \dot{m}_{MOS} = matéria orgânica seca introduzida [t/d])

significativa, pois não agrega a carga efetiva do biodigestor. Por essa razão, os rendimentos sempre devem ser analisados juntamente com a carga orgânica volumétrica.

A taxa de degradação (η_{MOS}) traduz a eficiência do aproveitamento do substrato. A taxa de degradação pode ser determinada com base na matéria orgânica seca (MOS) ou na demanda química de oxigênio (DQO). Em virtude dos processos analíticos predominantes na prática, recomenda-se a determinação da taxa de degradação com base na MOS [2-20].

$$\eta_{\text{MOS}} = \frac{\text{MOS}_{\text{Sub}} \cdot m_{\text{in}} - (\text{MOS}_{\text{sa}} \cdot m_{\text{sa}})}{\text{MOS}_{\text{Sub}} \cdot m_{\text{in}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Equação 2.5: Taxa de degradação (η_{MOS}) da biomassa (MOS_{Sub} = teor de matéria orgânica seca da matéria fresca introduzida [$\text{kg}/\text{t MF}$]; m_{in} = massa da matéria fresca introduzida [t];

MOS_{sa} = teor de matéria orgânica seca da saída do biodigestor [$\text{kg}/\text{t MF}$]; m_{sa} = massa dos biofertilizantes [t])

2.3.3 Agitação

Um nível de produção elevado de biogás só é possível através do contato intenso entre as bactérias e o substrato, o que geralmente é obtido pela agitação no biodigestor [2-1]. Em biodigestores sem agitadores, após um período observa-se a separação do conteúdo e a formação de camadas em virtude da diferença de densidade entre as várias substâncias que compõem o substrato, e também pelo empuxo provocado pela formação de gás. Por causa da sua densidade mais elevada, a maior parte da massa de bactérias se encontra embaixo, sendo que o substrato em decomposição frequentemente se acumula na camada superior. Em casos como esse, a área de contato entre essas duas camadas está restrita ao ponto em que elas se tocam e a decomposição é muito baixa. Além disso, forma-se um sobrenadante de sólidos flutuantes que dificulta a saída do gás [2-21].

Por isso, é importante promover o contato entre os microrganismos e o substrato por meio da agitação no biodigestor. Porém, deve-se evitar agitação intensa. Principalmente as bactérias acetogênicas (ativas na acetogênese) e as arqueas metanogênicas formam uma estreita comunidade, a qual tem grande importância para que o processo de formação do biogás ocorra normalmente. A destruição dessa comunidade por forças de cisalhamento muito elevadas causadas pela agitação intensa pode afetar negativamente a decomposição anaeróbia.

Portanto, deve ser procurado um equilíbrio que atenda a ambas necessidades. Na prática, isso é alcançado pela rotação lenta dos agitadores, originando forças de cisalhamento reduzidas, e pela agitação do conteúdo do reator em intervalos de tempo breves e previamente definidos. Outras questões técnicas pertinentes à agitação são tratadas no capítulo 3.2.2.3.

2.3.4 Potencial de geração de gás e atividade metanogênica

2.3.4.1 Potencial de rendimento de gás

A quantidade de biogás que pode ser produzida em uma usina depende principalmente da composição do substrato utilizado. Se possível, realizar um teste de fermentação com a mistura de substrato utilizada [2-22]. Também é possível estimar o rendimento de gás com base na soma das produções de gás dos substratos introduzidos, desde que cada componente do substrato e respectivos valores de produção constem das tabelas de referência [2-23].

A produção de gás a partir de substratos exóticos, para os quais não estão disponíveis dados de testes de fermentação, pode ser estimada pelo coeficiente de digestão, uma vez que existem paralelos entre os processos de decomposição em uma usina de biogás e a digestão de animais ruminantes [2-3]. Para isso, os coeficientes das biomassas dedicadas podem ser obtidos na tabela de rações da DLG (Sociedade Alemã de Agricultura). Nela se encontram os teores de matéria mineral (MM), fibra bruta (FB), extrato etéreo (EE), proteína bruta (PB) e extratos não nitrogenados (ENN) com base na matéria seca (MS) da ANÁLISE DE ALIMENTOS WEENDER e respectivas digestibilidades (DG). A soma das frações de FB e ENN equivale ao conteúdo de carboidratos.

Tabela 2.3: Produção de biogás específica e teor de metano dos respectivos grupos de substâncias [2-25]

	Produção de biogás [l/kg MOS]	Teor de metano [% em vol.]
Proteína digestível (PB)	700	71
Gordura digestível (EE)	1.250	68
Carboidratos digestíveis (FB + ENN)	790	50

Cada um dos grupos de substâncias se caracteriza por uma produção de gás específica e teor de metano próprio, que resultam das diferentes frações relativas de carbono (tabela 2.3) [2-6], [2-25].

Com base nessas especificações, é possível calcular a matéria orgânica seca e a respectiva massa de grupos de substâncias digeríveis por kg de matéria seca [2-24]:

Teor de MOS:

$$(1000 - \text{matéria mineral}^1)/10 \quad [\% \text{ MS}]$$

Proteína digestível:

$$(\text{proteína bruta} \cdot \text{DG}_{\text{RP}})/1000 \quad [\text{kg/kg MS}]$$

Gordura digestível:

$$(\text{gordura bruta} \cdot \text{DG}_{\text{EE}})/1000 \quad [\text{kg/kg MS}]$$

Carboidratos digestíveis:

$$((\text{fibra bruta} \cdot \text{DG}_{\text{FB}}) + (\text{ENN} \cdot \text{DG}_{\text{ENN}}))/1000 \quad [\text{kg/kg MS}]$$

¹⁾ em g/kg

O cálculo seguinte toma como exemplo a **silagem de gramíneas** (pasto extensivo, 1º crescimento, meia floração) (tabela 2.4).

Tabela 2.4: Valores característicos para silagem de gramíneas

MS [%]	Matéria mineral (MM) [g/kg MS]	Proteína bruta (PB) [g/kg MS]	DG _{PB} [%]	Extrato etéreo (EE) [g/kg MS]	DG _{EE} [%]	Fibra bruta (FB) [g/kg MS]	DG _{FB} [%]	ENN [g/kg MS]	DG _{ENN} [%]
35	102	112	62	37	69	296	75	453	73

O cálculo resulta em:

Teor de MOS:

$$(1000 - 102)/10 = 89,8\% \text{ (MS)}$$

Proteína digestível:

$$(112 \cdot 62\%)/1000 = 0,0694 \text{ kg/kg MS}$$

Gordura digestível:

$$(37 \cdot 69\%)/1000 = 0,0255 \text{ kg/kg MS}$$

Carboidratos digestíveis:

$$((296 \cdot 75\%) + (453 \cdot 73\%))/1000 = 0,5527 \text{ kg/kg MS}$$

Com isso, é possível calcular as massas de cada um dos grupos de substâncias por kg de MOS. Multiplicando os resultados pelos valores da tabela 2.3 obtém-se os rendimentos de biogás e metano exibidos na tabela 2.5.

Tabela 2.5: Rendimento de biogás e metano da silagem de gramíneas

	Rendimento de biogás [l/kg MOS]	Rendimento de metano [l/kg MOS]
Proteína digestível (PB)	48,6	34,5
Gordura digestível (EE)	31,9	21,7
Carboidratos digestíveis (FB + ENN)	436,6	218,3
Total (por kg MOS)	517,1	274,5

Cada kg de matéria fresca rende 162,5 litros de biogás com um teor de metano de aprox. 53%. Com base nisso, podemos afirmar que, na prática, os rendimentos de metano obtidos são significativamente maiores que os calculados. Segundo o atual nível de conhecimento, não existe método que, do ponto de vista estatístico, seja suficientemente confiável a ponto de permitir o cálculo exato do rendimento de gás. O método aqui apresentado permite unicamente comparar os substratos entre si.

No entanto, o rendimento de biogás que se pode atingir depende de outros fatores como o tempo de retenção dos substratos no biodigestor, o teor de matéria seca, a concentração de ácidos graxos e eventuais substâncias inibidoras. Desse modo, o aumento do

tempo de retenção melhora a taxa de degradação, refletindo em uma maior produção de gás. À medida em que o tempo de retenção transcorre, uma quantidade cada vez maior de metano vai sendo liberada, elevando o poder calorífico inferior da mistura gasosa.

Como já descrito no início do capítulo, é evidente a grande semelhança entre os processos que ocorrem no rúmen de animais ruminantes e os processos de decomposição em um reator de biogás. Porém, os dois processos podem ser comparados só até certo ponto, pois efeitos sinérgicos diferentes podem ocorrer em cada um dos dois "sistemas", influenciando a produção de biogás. O método de cálculo apresentado permite apenas uma estimativa aproximada do rendimento real de gás e metano, **não** podendo, portanto, ser utilizado para cálculos econômicos e operacionais. Por outro lado, o método exposto permite estimar tendências do rendimento de biogás e estabelecer comparações entre os vários substratos.

O aumento da temperatura permite também a aceleração dos processos de decomposição. Essa aceleração, porém, é possível somente até determinados limites, uma vez que quando a temperatura máxima é excedida as bactérias são prejudicadas, resultando no efeito contrário (ver capítulo 2.2.2). O aumento da produção, contudo, é acompanhado de uma liberação mais acentuada de dióxido de carbono da fase líquida, o que por sua vez ocasiona uma piora do poder calorífico inferior da mistura gasosa.

O teor de matéria seca no biodigestor (teor de MS) pode influenciar o rendimento de gás sob dois aspectos. Por um lado, elevados teores de MS dificultam o transporte da matéria, de forma que os microrganismos são capazes de decompor somente a parte do substrato com a qual têm contato direto. Teores de matéria seca bastante elevados de $\geq 40\%$ podem até ocasionar a suspensão da fermentação em função da escassez de água necessária para o crescimento dos microrganismos. Por outro lado, em virtude dos elevados teores de matéria seca, problemas podem ser causados por inibidores, que ocorrem em forma concentrada em função do baixo teor de água. O pré-tratamento mecânico ou térmico dos substratos utilizados melhora a sua disponibilidade às bactérias, aumentando o rendimento [2-4].

2.3.4.2 Qualidade do gás

O biogás é uma mistura gasosa composta principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), bem como vapor d'água e diversos gases traço.

De todos os componentes, o de maior importância é o metano, pois ele representa a parte combustível do biogás e, portanto, seu teor influencia diretamente o poder calorífico inferior. O controle de processo seletivo dá pouca margem para a alteração da composição do biogás, que depende principalmente da composição do material introduzido. Além disso, o teor de metano é influenciado por parâmetros do processo tais como a temperatura de fermentação, nível de carga do reator e tempo de retenção hidráulica, bem como pela biodessulfurização e por distúrbios no processo.

O rendimento potencial de metano é determinado principalmente pela composição do substrato utilizado, ou seja, pelos seus teores de gorduras, proteínas e carboidratos (ver capítulo 2.3.4.1). Esses três grupos apresentam diferentes rendimentos específicos de metano, sendo o das gorduras elevado, o das proteínas médio e o dos carboidratos baixo. Em termos de massa, as gorduras permitem maior rendimento de metano que os carboidratos.

A concentração do gás traço sulfeto de hidrogênio (H_2S) tem um importante papel na qualidade da mistura gasosa. A concentração não pode ser elevada demais, pois já em reduzidas concentrações o sulfeto de hidrogênio é capaz de inibir o processo de digestão. Além disso, elevadas concentrações de H_2 no biogás acarretam corrosão em usinas de cogeração e caldeiras [2-1]. A tabela 2.6 dá uma visão geral da composição média do biogás.

Tabela 2.6: Composição média do biogás (conforme [2-1])

Componente	Concentração
Metano (CH_4)	50% - 75% em vol.
Dióxido de carbono (CO_2)	25% - 45% em vol.
Água (H_2O)	2% - 7% em vol. (20 - 40 °C)
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	20 - 20.000 ppm
Nitrogênio (N_2)	< 2% em vol.
Oxigênio (O_2)	< 2% em vol.
Hidrogênio (H_2)	< 1% em vol.

2.4 Fontes bibliográficas

- [2-1] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Nova Iorque, 2001
- [2-2] Braun, R.: *Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe*; Springer Verlag Viena, Nova Iorque, 1982
- [2-3] Kloss, R.: *Planung von Biogasanlagen*; Oldenbourg Verlag Munique, Viena, 1986
- [2-4] Schattner, S.; Gronauer, A.: *Methangärung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen*, Gülzower Fachgespräche, volume 15: *Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, pp. 28 – 38, Weimar, 2000
- [2-5] Wandrey, C.; Aivasidis, A.: *Zur Reaktionskinetik der anaeroben Fermentation*; *Chemie-Ingenieur-Technik* 55, nº 7, pp. 516 – 524, Weinheim, 1983
- [2-6] Weiland, P.: *Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate*; *VDI-Berichte*, nº 1620 "Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven"; pp. 19-32; VDI-Verlag 2001
- [2-7] Bauer, C.; Korthals, M.; Gronauer, A.; Lebuhn, M.: *Methanogens in biogas production from renewable resources – a novel molecular population analysis approach*. *Water Sci. Tech.* 2008, 58, nº 7, pp. 1433 – 1439
- [2-8] Lebuhn, M.; Bauer, C.; Gronauer, A.: *Probleme der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Langzeitbetrieb und molekularbiologische Analytik*. *VDLUFA-Schriftenreihe* 64, 2008, pp. 118 – 125
- [2-9] Kroiss, H.: *Anaerobe Abwasserreinigung*. *Wiener Mitteilungen* vol. 62; Technische Universität Wien, 1985
- [2-10] Demirel, B.; Neumann L.; Scherer, P.: *Microbial community dynamics of a continuous mesophilic anaerobic biogas digester fed with sugar beet silage*. *Eng. Life Sci.* 2008, 8, nº 4, pp. 390 – 398
- [2-11] Oechsner, H., Lemmer, A.: *Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten?*, *VDI-Berichte* 2057, 2009, pp. 37 – 46
- [2-12] Lindorfer, H.; Braun, R.; Kirchmeyr, R.: *The self-heating of anaerobic digesters using energy crops*; *Water Science and Technology* 53 (8), 2006
- [2-13] Wellinger, A.; Baserga, U.; Edelmann, W.; Egger, K.; Seiler, B.: *Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*, Verlag Wirz – Aarau, 1991
- [2-14] Weiland, P.: *Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland*, Gülzower Fachgespräche, volume 15: *Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, pp. 8 – 27, Weimar, 2000
- [2-15] Abdoun, E.; Weiland, P.: *Optimierung der Monovergärung von nachwachsenden Rohstoffen durch die Zugabe von Spurenelementen*; *Bornimer Agrartechnische Berichte* nº 68, Potsdam, 2009
- [2-16] Bischoff, M.: *Erkenntnisse beim Einsatz von Zusatz- und Hilfsstoffen sowie Spurenelementen in Biogasanlagen*; *VDI Berichte* nº 2057; "Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft"; VDI Verlag, Düsseldorf, 2009
- [2-17] Bischoff, Manfred.: *depoimento pessoal*, 2009
- [2-18] Seyfried, C.F. et al.: *Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern*. *Korrespondenz Abwasser* 37, pp. 1247 – 1251, 1990
- [2-19] Preißler, D.: *Die Bedeutung der Spurenelemente bei der Ertragssteigerung und Prozessstabilisierung*; *Atas da 18ª Conferência Anual da Fachverband Biogas*, Hannover, 2009
- [2-20] *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.): Biogas-Messprogramm II*, Gülzow, 2009
- [2-21] Maurer, M.; Winkler, J-P., *Biogas – Theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen*, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1980
- [2-22] *VDI-Richtlinie 4630: Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche*. VDI-Gesellschaft Energietechnik, 2006
- [2-23] *KTBL (Hrsg.): Faustzahlen Biogas. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft*, 2009
- [2-24] *Biogasanlagen zur Vergärung nachwachsender Rohstoffe*; *Atas do Congresso Barnstorfer Biogastagung 2000*; *Ländliche Erwachsenenbildung Niedersachsen (LEB)*
- [2-25] Baserga, U.: *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen*; *FAT- Berichte* nº 512, 1998

Tecnologia de Usinas para a Produção de Biogás



Este capítulo aborda o amplo espectro de tecnologias de usinas para a produção de biogás. O número de combinações entre componentes e equipamentos é praticamente infinito. Por isso, o capítulo apresentará cada um dos equipamentos com exemplos técnicos. No entanto, o sistema e os equipamentos têm de ser submetidos caso a caso à análise de especialistas para verificar a sua capacidade de adaptação.

É prática comum que a construção de usinas de biogás envolva um único fornecedor, denominado fornecedor principal (FP), o que significa prós e contras para o proprietário do projeto. A vantagem de um único fornecedor é que as tecnologias utilizadas geralmente são bem integradas, e a garantia é válida para a usina completa, incluindo os seus componentes. Com isso, assegura-se também a funcionalidade do processo de geração de biogás. Geralmente, a entrega do equipamento pronto é realizada somente após a conclusão de testes de desempenho, ou seja, após o equipamento ter atingido a sua carga nominal. Isso é de suma importância, uma vez que, em primeiro lugar, a responsabilidade pela partida do equipamento recai sobre o fabricante. Em segundo lugar, a futura operadora da usina não está sujeita ao risco financeiro ocasionado por atrasos, no caso de não cumprimento do cronograma de entrega. A desvantagem é que o proprietário tem relativamente pouca influência sobre os detalhes técnicos do projeto, visto que muitos fornecedores oferecem módulos padronizados sem muita flexibilidade na configuração de equipamentos. Apesar disso, a obtenção da licença, a construção e a operação de uma usina com arquitetura modular é algo mais barato e rápido de implementar.

O proprietário também tem a opção de adquirir do fornecedor da usina somente o projeto (contrato de engenharia). As fases do projeto são então solicitadas pelo proprietário às empresas especializadas. Esse caminho permite o grau máximo de personalização, mas só é recomendado se o proprietário já dispuser da necessária

experiência. A desvantagem é que ele assume os riscos da entrada em operação e dos testes de desempenho. Desse modo, eventuais direitos de regresso têm de ser exigidos individualmente junto às empresas especializadas.

3.1 Características e diferenciação das diferentes técnicas

A geração de biogás pode ser realizada por meio de diferentes técnicas. As técnicas típicas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Classificação das técnicas de geração de biogás conforme diferentes critérios

Critério	Tipo
Teor de matéria seca dos substratos	- digestão úmida - digestão seca
Tipo de alimentação	- descontínua - semicontínua - contínua
Nº de fases do processo	- uma fase - duas fases
Temperatura do processo	- psicofílico - mesofílico - termofílico

3.1.1 Teor de matéria seca dos substratos de fermentação

A consistência dos substratos depende do seu teor de matéria seca, o que justifica a classificação básica da tecnologia de biogás em técnicas de digestão seca e técnicas de digestão úmida. A digestão úmida se realiza com substratos bombeáveis. A fermentação a seco faz uso de substratos empilháveis.

Não existe um limite rígido entre a digestão úmida e a seca. A digestão seca foi vinculada a determinadas condições, conforme definições estipuladas em publicação de apoio do Ministério do Meio Ambiente da Alemanha, baseadas na Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG), de 2004. A publicação prevê, na entrada, um teor de matéria seca de no mínimo 30% (base em massa) e uma carga orgânica volumétrica de no mínimo $3,5 \text{ kg}_{\text{MOS}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ no biodigestor.

Na digestão úmida, o substrato líquido pode ter um teor de matéria seca de até 12% (em massa). Como regra empírica, é válido o limite de 15% em massa para a bombeabilidade do meio. Esse valor, porém, é qualitativo e não deve ser aplicado para todos os substratos utilizados. Alguns substratos, com distribuição de partículas finamente dispersas e elevado teor de substâncias solúveis, são bombeáveis também para teores de MS de até 20% em massa, tais como restos de alimentos dispersos por veículos-tanque. Em contrapartida, outros substratos são passíveis de empilhamento com apenas 10% a 12% em massa, como, por exemplo, cascas de frutas e legumes.

A maioria das usinas de biogás agrícolas adota a digestão úmida, realizada nos típicos reservatórios circulares. No entanto, desde a 1ª revisão da EEG, em 2004, o mercado tem presenciado a maturidade comercial das usinas de digestão seca, que vêm sendo utilizadas principalmente na fermentação de biomassas dedicadas. A explicação detalhada dos tipos de biodigestores se encontra em 3.2.2.1.

3.1.2 Tipo de alimentação

O regime de alimentação da usina de biogás determina em grande parte a disponibilidade do substrato fresco para os microrganismos, tendo, assim, impacto sobre a geração do biogás. Essencialmente, a alimentação se classifica em contínua, semicontínua e descontínua ou em batelada.

3.1.2.1 Alimentação contínua e semicontínua

Nos modos de alimentação contínua e semicontínua, faz-se a distinção entre a técnica de fluxo contínuo e a técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento. A técnica de armazenamento, ainda mencionada na literatura, não será discutida aqui, pois tem utilização prática muito limitada, por motivos de ordem técnica e econômica. Ao contrário da alimentação contínua, na alimentação semicontínua uma carga de substrato não fermentado é introduzida no biodigestor no mínimo uma vez a cada dia de trabalho. Sendo

assim, comprovou-se que a alimentação em pequenas cargas várias vezes ao dia oferece vantagens.

Técnica de fluxo contínuo

Antigamente, a maioria das usinas de biogás utilizava a técnica de fluxo contínuo. Nela, o substrato é bombeado várias vezes por dia de um tanque de reserva ou de um tanque de carga para o biodigestor. A mesma quantidade de substrato carregada no biodigestor chega ao reservatório de biofertilizantes por pressão ou retirada (ver figura 3.1).

Nessa técnica, o biodigestor se encontra sempre cheio, sendo esvaziado apenas para reparos. A técnica de fluxo contínuo se caracteriza por uma produção de gás uniforme e uma utilização eficiente do espaço do biodigestor. No entanto, existe o risco de curto-circuito no biodigestor, ou seja, que uma pequena parte do substrato recém-introduzido saia de imediato do biodigestor [3-2]. Além disso, o reservatório de biofertilizantes aberto é uma fonte de emissões de gás metano. A 2ª revisão da EEG, de 2009, enfatiza que se armazenem os biofertilizantes em local estanque a gases, de forma que a técnica de fluxo contínuo futuramente perderá a importância.

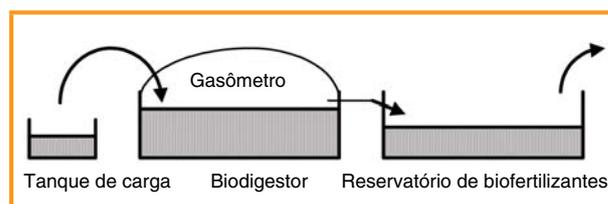


Figura 3.1: Esquema da técnica de fluxo contínuo

Técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento

Usinas de biogás que operam segundo a técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento incluem também o reservatório de biofertilizantes. O biogás que aqui chega pode ser coletado e aproveitado. Assim, o reservatório de biofertilizantes funciona como um tanque pulmão. A jusante desse tanque pulmão se encontra instalado um reator de fluxo contínuo. Do reator de fluxo contínuo também pode ser retirado substrato. Por exemplo, quando há uma grande demanda por substrato fermentado para fins de adubação. A figura 3.2 mostra uma visão geral da técnica. Tal técnica permite uma produção de gás uniforme. O tempo de retenção não pode ser determinado com exatidão, pois não se exclui a possibilidade de ocorrência de curtos-circuitos no reator de fluxo contínuo [3-2]. Essa variante representa o estado da técnica. Os

custos de investimento do reservatório de biofertilizantes podem ser sucessivamente refinanciados pela produção adicional de gás.

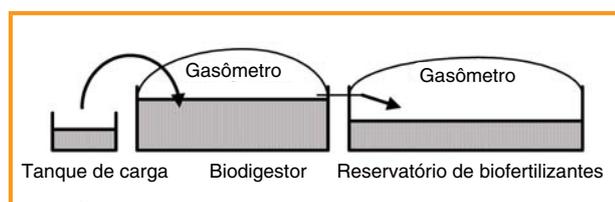


Figura 3.2: Esquema da técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento

3.1.2.2 Alimentação descontínua

Na fermentação em batelada, enche-se completamente o biodigestor com substrato fresco, fechando-o hermeticamente na sequência. O substrato permanece no reservatório até o fim do tempo de retenção selecionado, sem que haja retirada ou adição de mais substrato. Ao fim do tempo de retenção, o biodigestor é esvaziado e enchido com substrato fresco, e uma parte do material decomposto pode permanecer no reservatório a fim de inocular a carga seguinte. Para o rápido enchimento e esvaziamento do reservatório de batelada, são necessários também reservatórios de armazenamento e depósito. A taxa de produção de gás no processamento intermitente varia ao longo do tempo. Após o enchimento, a produção de gás se inicia lentamente. Conforme o substrato, ela atinge o seu pico após alguns dias e começa a decrescer gradativamente. Com isso, não é possível atingir produção e qualidade do gás constantes com apenas um biodigestor, o que pode ser compensado pelo enchimento de vários biodigestores com intervalos de tempo entre si (bateria de reservatórios). Isso permite a operação respeitando com precisão o tempo mínimo que o material deve ficar retido [3-2]. Na prática, o processamento em batelada com biodigestor simples tem pouca relevância, tendo o processamento em bateria aplicação em biodigestores do tipo garagem (fermentação a seco).

3.1.3 Número de fases e estágios do processo

Entende-se por fase do processo o meio biológico – fase de hidrólise ou fase de metanização –, com as respectivas condições específicas de processo, tais como valor do pH e temperatura. O processamento em um único reservatório é denominado sistema monofásico. Quando as fases de hidrólise e metanização são reali-

zadas em reservatórios diferentes, o sistema é denominado bifásico. Já estágio é o termo usado para descrever o reservatório do processo, independentemente da fase biológica.

Assim, uma configuração composta, por exemplo, de tanque de carga, biodigestor e reservatório de pós-digestão, comum no meio agrícola, é monofásica, mas tem três estágios. O tanque de carga aberto não representa uma fase em si. Em contrapartida, o reservatório de alimentação fechado é considerado uma fase (fase de hidrólise). Ambos – o biodigestor e o pós-digestor – pertencem à fase de metanização.

Em usinas de biogás agrícolas, utiliza-se principalmente a variante de uma fase ou de duas fases, sendo a maioria do tipo monofásica [3-1].

3.2 Técnica de processamento

Qualquer que seja a modalidade operacional, uma usina de biogás agrícola geralmente pode ser dividida em quatro etapas de processamento:

1. Gerenciamento do substrato (entrega, armazenamento, tratamento, transporte e carregamento)
2. Geração de biogás
3. Armazenamento, preparação e deposição de biofertilizantes
4. Armazenamento, purificação e utilização do biogás

Cada uma das etapas é ilustrada detalhadamente na figura 3.3.

As quatro etapas não são isoladas entre si, existindo uma forte interdependência, principalmente entre a segunda e a quarta etapa, pois esta normalmente disponibiliza o calor necessário para aquela.

A purificação e a utilização do biogás pertencentes à etapa 4 são descritas separadamente no capítulo 6, e a preparação e o tratamento dos biofertilizantes são explicados no capítulo 10. A seguir, serão discutidas as técnicas e tecnologias aplicadas nas etapas 1, 2 e 3.

A escolha do equipamento técnico a ser utilizado na usina depende principalmente do substrato disponível. A quantidade de substrato determina o dimensionamento de todos os equipamentos e volumes de reservatórios. A qualidade dos substratos (teor de matéria seca, estrutura, origem, etc.) determina qual tecnologia será adotada no projeto. Dependendo da composição do substrato, pode ser necessário separar materiais estranhos ou misturá-lo com adição de água a fim de torná-lo bombeável. É necessário, também, planejar uma higienização, caso sejam utilizadas substâncias que o exijam. Após o pré-tratamento,

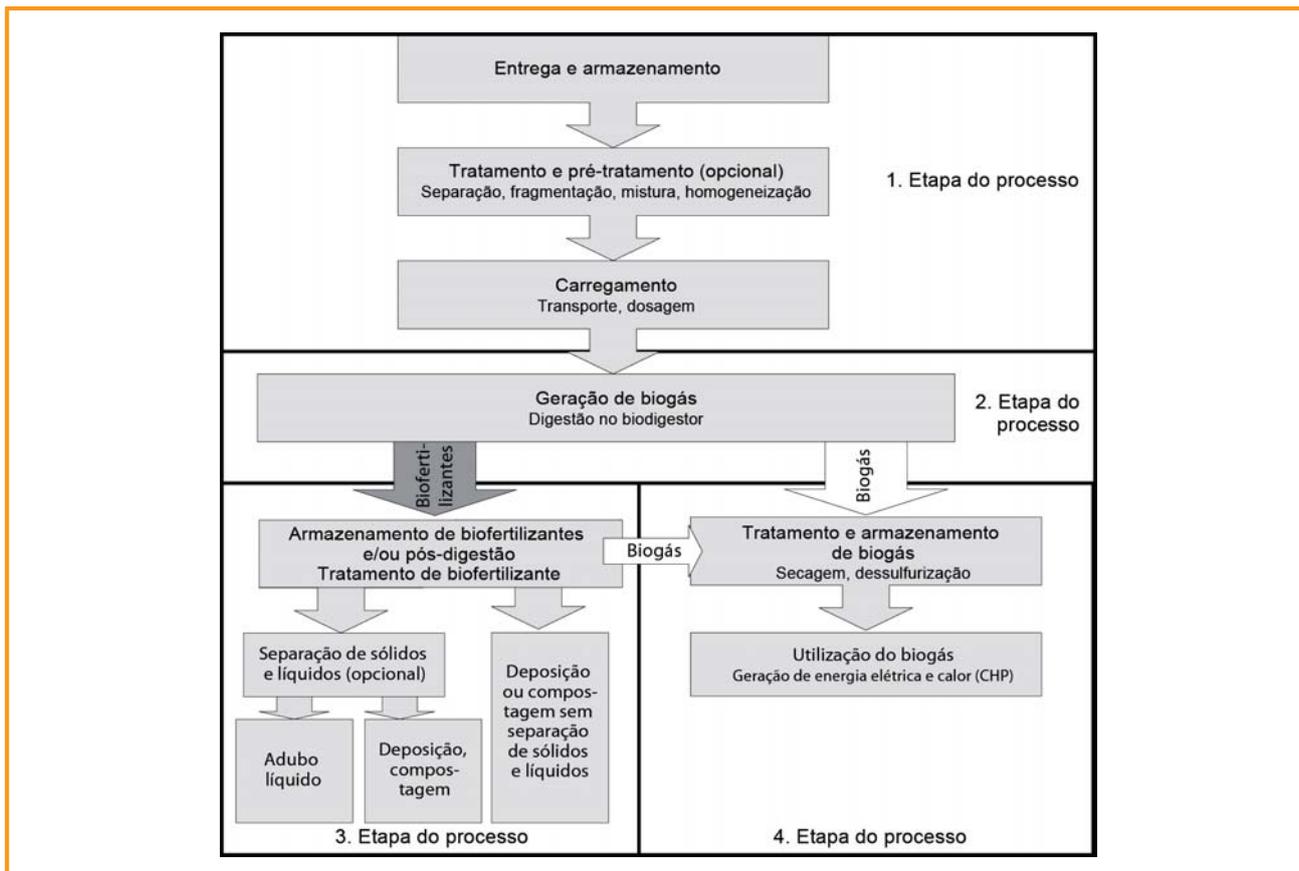


Figura 3.3: Diagrama genérico do processo de geração de biogás, conforme [3-3]

o substrato chega ao biodigestor, onde será fermentado.

Na digestão úmida, geralmente são utilizados equipamentos, de um ou dois estágios, que operam com a técnica de fluxo contínuo. No sistema de dois estágios, a montante do biodigestor principal, é instalado um pós-digestor. O substrato é encaminhado do biodigestor ao pós-digestor, no qual se dá a decomposição das substâncias de difícil degradação. Os biofertilizantes são armazenados em reservatórios fechados, com captação de biogás, ou em reservatórios abertos, e normalmente aplicados em áreas agrícolas, como na forma de adubo líquido.

O biogás produzido durante a fermentação é armazenado e purificado, e sua utilização se dá principalmente em usinas de cogeração para a produção combinada de calor e eletricidade. A figura 3.4 mostra os componentes, módulos e equipamentos essenciais de uma usina de biogás agrícola de um estágio, para co-substratos com higienização.

As etapas do processo podem ser vistas a seguir: da primeira etapa (armazenamento, preparação, transporte e carregamento dos substratos) fazem parte o tanque de carga ou de esterco (2), o de coleta (3) e o de hi-

gienização (4). A geração do biogás constitui a segunda etapa do processo e acontece no reator de biogás (5), também denominado biodigestor. A terceira etapa envolve o tanque de biomassa fermentada (8) ou depósito de biofertilizantes, e a aplicação do substrato digerido em lavouras (9). Realizada no gasômetro (6) e na usina de cogeração (7), a quarta etapa se encarrega do armazenamento, limpeza e utilização do biogás. Cada uma das etapas será abordada em detalhe mais adiante.

3.2.1 Gerenciamento de substrato

3.2.1.1 Entrega

A entrega tem importância somente nos casos em que co-substratos de fontes externas são utilizados. Por razões de ordem contábil e de registro de comprovação, na entrega do substrato deve ser realizada pelo menos uma inspeção visual, objetivando garantir as exigências de qualidade. Cada vez mais, as usinas de grande porte de fermentação de biomassas dedicadas vêm utilizando métodos de teste rápido para a inspeção da matéria seca e, em parte, da fração de ração. Isso acontece com o objetivo de garantir a conformidade às con-

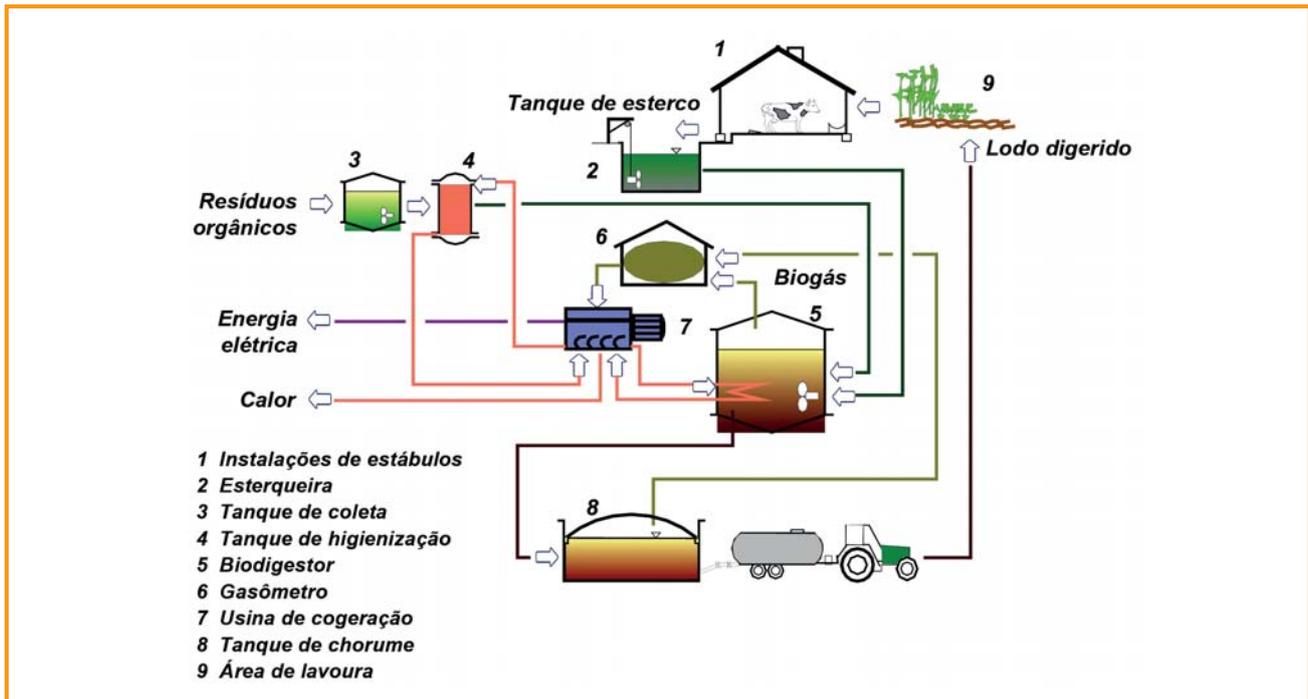


Figura 3.4: Esquema de uma usina de biogás agrícola com utilização de cosubstrato [ATB]

dições do contrato de fornecimento e o pagamento justo.

Em essência, deve-se pesar o substrato fornecido e registrar todos os dados de entrada. Substratos declarados como resíduos merecem especial atenção, uma vez que, conforme a sua classificação, pode-se exigir que sejam documentados ou que se satisfaçam exigências de autoridades. Por essa razão, também são coletadas amostras de reserva de substratos críticos para uso posterior. Maiores informações sobre as disposições legais e administrativas podem ser encontradas no capítulo 7.

3.2.1.2 Armazenamento

Essencialmente, a função de depósitos de substrato é manter uma quantidade necessária de substrato para alimentar o sistema de algumas horas até dois dias. A concepção do depósito depende dos substratos utilizados. A área necessária para o depósito é definida conforme as quantidades de matéria esperadas e os períodos em que o fluxo de substrato deverá ser equilibrado. Se houver aquisição de cossustratos, estipulações contratuais, tais como quantidade e frequência do fornecimento, são fatores a serem considerados. Se a higiene dos cossustratos for crítica – substratos de origem industrial, por exemplo – deve-se garantir rigorosamente a estrita separação entre a estação de recebimento e as operações agrícolas. Deve-se excluir a

possibilidade de que substratos críticos do ponto de vista higiênico se misturem a substratos inócuos antes da aplicação de medidas de higienização.

O uso de depósitos fechados para reduzir odores não se deve somente a exigências da legislação de emissões. O abrigo em galpões é uma possibilidade. Além do armazenamento, estruturas desse tipo permitem também a recepção e preparação dos substratos. Nelas, é possível capturar o ar exalado e transportá-lo para equipamentos de purificação de ar (p. ex. por lavadores e/ou filtros biológicos). Em usinas de digestão de resíduos, esses galpões são frequentemente equipados com um sistema de subpressão que, além de aspirar o ar, evita em grande parte a saída de odores. Os galpões possibilitam a redução de odores e protegem os equipamentos, permitindo a operação e o controle independentemente das condições climáticas. Eles podem, também, ser uma forma de atender a regulamentos de proteção contra ruídos. A tabela 3.2 mostra uma visão geral do armazenamento de substratos.

3.2.1.3 Tratamento

O tipo e o escopo da preparação dos substratos influenciam a sua utilidade geral no que tange ao conteúdo de material estranho, tendo, assim, influência direta na disponibilidade da tecnologia da usina. Além disso, uma preparação adequada permite influenciar positivamente o processo fermentativo, o que possibi-

Tabela 3.2: Armazenamento do substrato antes da fermentação

Dimensionamento	<ul style="list-style-type: none"> • depende de volume de substrato, capacidade do biodigestor, compensação da irregularidade das entregas, características do uso da terra e produção de cossubstratos, contratos de fornecimento de substratos externos, possíveis quedas operacionais
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • evitar o congelamento de equipamentos de armazenamento, por exemplo, colocando os tanques de armazenamento em galpões, aquecendo os reservatórios de armazenamento ou posicionando fossas abaixo do nível do terreno • evitar processos de decomposição que possam diminuir a produção de gás • evitar a mistura de substratos inócuos com substratos críticos do ponto de vista higiênico • implementar medidas construtivas para reduzir os odores • evitar vazamentos no solo e nas águas
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • depósitos para substratos sólidos de uso comum na agricultura, como silos trincheira, verticais, estufas recobertas por lona de PVC, silagem em bolsas de plástico, áreas de armazenamento abertas ou com telhado (p. ex. armazéns de esterco) e fossas/covas • depósitos para substratos líquidos de uso comum na agricultura, tais como fossas e tanques de carga
Custos	<ul style="list-style-type: none"> • geralmente a possibilidade de armazenamento está disponível; em edificações novas, o preço tem de ser calculado caso a caso com base nas diversas variáveis citadas anteriormente



Figura 3.5: Separador de materiais pesados em tubulação [DBFZ]

lita explorar ao máximo o potencial energético dos substratos utilizados.

Classificação e remoção de materiais estranhos

A necessidade de classificar e remover materiais estranhos vincula-se à origem e composição do substrato. Os materiais estranhos mais comuns são as pedras, que na maioria dos casos são removidas regularmente do fundo do tanque de carga. São também utilizados separadores de materiais pesados, acoplados diretamente ao condutor do substrato, à frente do transportador (ver figura 3.5). Outros materiais estranhos são separados manualmente na entrega do substrato ou durante o enchimento do equipamento de alimentação. Outra importante fonte de materiais estranhos são os resíduos orgânicos. Quando utilizados como cossubstrato, observar se os resíduos estão livres de materiais estra-

nhos. A maioria das empresas agrícolas não dispõe dos recursos exigidos pela onerosa separação por meio de câmaras de classificação ou vias mecânicas de preparação, utilizadas em usinas dedicadas ao processamento de resíduos orgânicos. Biodigestores do tipo garagem, por outro lado, são praticamente insensíveis a materiais estranhos, uma vez que o transporte do substrato é realizado principalmente por carregadeiras e garras. Isso exclui a possibilidade de contato com componentes sensíveis a materiais estranhos, tais como bombas, guarnições e transportadores helicoidais.

Fragmentação

A fragmentação do substrato torna a sua superfície acessível ao processo de biodegradação e, portanto, à produção de metano. De modo geral, embora a taxa da biodegradação aumente com substratos mais fragmentados, o rendimento de gás não é necessariamente maior. Entre outros fatores, a geração de metano é produto da interação entre o grau de fragmentação e o tempo de permanência. Nisso reside a importância de se adotar a tecnologia correta.

O equipamento para fragmentar o substrato sólido pode ser instalado externamente, antes do ponto de carregamento no tanque de carga, canalização ou biodigestor. A gama de equipamentos inclui picadores, moinhos, esmagadores, bem como eixos e transportadores helicoidais dotados de dispositivos de corte e dilaceramento (ver figura 3.7). É muito comum a utilização de eixos com palhetas e roscas de transporte com facas em unidades combinadas de dosagem e alimentação (ver figura 3.6). Dada sua ampla gama de aplicações, as propriedades das unidades de fragmentação são resumidas para equipamentos para dosagem direta

Tabela 3.3: Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de trituração em unidades combinadas de dosagem e alimentação

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • fragmentação de até 50 m³ por dia com unidades simples disponíveis no mercado (o reservatório de alimentação pode ser dimensionado para uma capacidade bem maior)
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • silagens comuns, mix de milho e espiga (CCM), esterco bovino (também de aves), restos de panificadoras, hortaliças • tambores dentados e roscas misturadoras com facas repicadoras são mais adequados para substâncias com fibras longas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + elevadas taxas de processamento + fácil enchimento com carregadeira ou garra + grande volume de reserva para o controle automatizado da fragmentação e alimentação + uso de equipamento robusto
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - possivelmente, o material pode emperrar sobre o triturador, grandemente influenciado pela geometria do reservatório de alimentação e pelo substrato - em caso de avaria, o material tem de ser retirado manualmente
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • eixos com palhetas reduzem o risco de emperramento sobre o triturador
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • vagão forrageiro com rosca misturadora vertical dotado de facas repicadoras • reservatório de alimentação com roscas para a fragmentação e transporte • reservatório de alimentação com eixos de palhetas para a fragmentação e transporte • reservatório de alimentação com roscas dentadas/equipamento de moagem para a fragmentação e dosagem
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • conforme informações dos fabricantes, os equipamentos exigem pouca manutenção; opção de contratos de manutenção • deve haver a possibilidade de realizar a manutenção nas pausas da alimentação



Figura 3.6: Reservatório de alimentação com desagregador [Konrad Pumpe GmbH]

de sólidos em combinação com unidades de alimentação e dosagem (tabela 3.3) e para moinhos e picadores (tabela 3.4).

Ao contrário dos sólidos, que necessitam ser fragmentados antes de seu encaminhamento para o tanque de carga, tubulação ou biodigestor, os líquidos contendo sólidos ou fibras podem ser fragmentados diretamente no tanque de carga, em outros reservatórios de mistura ou na tubulação. Isso pode ser necessário em substratos e misturas de substratos cuja consistência signifique risco para o equipamento de alimentação (normalmente uma bomba). A fragmentação pode ser realizada, por exemplo, por agitadores de fragmentação separados na fossa localizada antes

do biodigestor, embora seja comum o acoplamento direto entre o triturador e a tubulação de transporte desse substrato, ou mesmo a combinação em um único equipamento. Geralmente, os equipamentos são tracionados por motor elétrico. Em alguns casos, é possível conectá-los ao eixo de tração de um trator. As opções de fragmentação são explicadas e ilustradas nas figuras 3.8 e 3.9, bem como nas tabelas 3.5 a 3.7.

Mistura, homogeneização

Na digestão úmida, a mistura do substrato permite aumentar o seu teor de umidade, tornando-o bombeável e possibilitando o seu transporte até o biodigestor. Ela se dá, normalmente, no tanque de carga ou outro reservatório, imediatamente antes do carregamento do substrato no processo de fermentação. A mistura é realizada com esterco líquido, biofertilizantes (prensados), águas residuárias ou excepcionalmente com água fresca, conforme a disponibilidade desses recursos. O uso de biofertilizantes líquidos pode reduzir o consumo de água fresca e oferece a vantagem de já inocular o substrato com bactérias do processo de digestão antes de sua chegada ao biodigestor. Assim, esse procedimento é muito indicado após a higienização ou no fluxo em pistão, também denominado fluxo pistonado. Se possível, evitar o uso de água fresca em função do custo elevado.

Tabela 3.4: Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de fragmentação externos

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • moinhos: taxas pequenas a médias (p. ex. 1,5 t/h a 30 kW) • picador: também pode ser utilizado para elevadas taxas
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • silagens comuns, CCM, cereais, milho grão (moinho em geral suficiente) • batata, beterraba, dejetos verdes (moinho, picador)
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + acesso fácil ao equipamento em caso de avarias + uma reserva de substrato fragmentado pode ser preparada + o enchimento é automatizado e pode ser combinado com unidades de alimentação + grau de fragmentação controlável
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - em caso de obstruções, o equipamento tem de ser esvaziado manualmente - média tolerância a materiais estranhos, embora desgaste elevado seja possível
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • podem ser instalados reservatórios de alimentação em diferentes tamanhos • a altura dos reservatórios de alimentação deve se adequar ao equipamento disponível
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • p. ex. moinho de martelo, moinho de rolo, picador (geralmente possível também em versão móvel)
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • pode ser adquirida do fabricante sob contrato e depende dos substratos processados • uma reserva de material fragmentado pode ser mantida a fim de suprir a produção durante paradas de manutenção



Figura 3.7: moinho de martelo e de rolo para fragmentação de substratos sólidos [Huning Maschinenbau GmbH, DBFZ]

Tabela 3.5: Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de fragmentação no tanque de carga

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • potência de entrada: ordens de magnitude típicas da tecnologia de agitação, com um adicional de 6 kW em agitadores de 5 - 15 kW
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • esterco sólido, restos de alimentos, resíduos verdes, palha
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + descarga direta do material sólido no tanque de carga + dispensa equipamentos adicionais
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - é possível elevar o teor de matéria seca no biodigestor até o ponto em que sua bombeabilidade não seja comprometida - risco de formação de sobrenadante e sedimentação, conforme o tipo de substrato
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • no caso do carregamento direto da matéria sólida no biodigestor, p. ex. por meio de dosadores, pode-se utilizar equipamentos de fragmentação também no biodigestor
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • geralmente na forma de pás do agitador com facas, ou montagem adicional de facas no eixo do agitador
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • conforme o tipo do agitador, pode-se realizar a manutenção fora do tanque de carga ou do biodigestor sem interrupção do processo

Tabela 3.6: Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de fragmentação na linha de transporte

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • triturador de prato perfurado capaz de transportar 600 m³/h, potência do motor entre 1,1 e 15 kW • triturador de eixo duplo em linha baseado em bombas de lóbulos: capacidade de fragmentação de até 350 m³/h • os dados característicos dos equipamentos dependem muito do teor de matéria seca; a capacidade de transporte é inversamente proporcional ao teor de matéria seca
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • triturador de prato perfurado apropriado para substratos fibrosos • triturador de eixo duplo em linha apropriado, também, para substratos bombeáveis com teores mais elevados de sólidos
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + acesso fácil ao equipamento se ocorrerem avarias + em caso de obstruções, pode-se abrir e realizar a manutenção dos equipamentos com facilidade + separação de materiais estranhos por meio de recipiente de separação (triturador de prato perfurado)
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - é possível elevar o teor de matéria seca no biodigestor até o ponto em que sua bombeabilidade não seja comprometida - desgaste elevado por substrato com alto teor de materiais estranhos (triturador de eixo duplo em linha)
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • os equipamentos devem ser separados do condutor do substrato por meio de válvula guilhotina • no caso de avaria, pode ser útil realizar um bypass por meio de uma válvula guilhotina • a escolha do método de corte ou dilaceramento condiciona o tamanho das partículas que se pode atingir
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • triturador de prato perfurado: faca rotativa posicionada à frente de uma peneira de corte • triturador de eixo duplo em linha: com eixos dotados de ferramentas de corte ou dilaceramento
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • equipamentos separados podem ser mantidos sem necessitar de longas paradas • aberturas para limpeza de fácil acesso agilizam substancialmente os trabalhos



Figura 3.8: fragmentação de substrato na linha de transporte (triturador de prato perfurado) [Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH]

No uso de água de processos de limpeza para a mistura, considerar que desinfetantes podem prejudicar o processo de fermentação, uma vez que esse tipo de substância tem efeito negativo sobre a microbiota no biodigestor. A tecnologia de bombeamento utilizada na mistura é explicada na seção "Transporte e carregamento de substrato".

A homogeneidade do substrato introduzido é de suma importância para a estabilidade do processo fermentativo. A oscilação da carga e a troca da composição do substrato exigem que os microrganismos se adaptem às diferentes condições, o que se reflete negativamente no rendimento de biogás. Via de regra, os substratos bombeáveis são homogeneizados por meio

de agitadores no tanque de carga. A homogeneização também pode ocorrer no biodigestor se forem realizados o bombeamento direto de substratos diferentes, no caso de líquidos, ou a introdução direta, no caso de sólidos. A tecnologia de agitadores é apresentada na seção "Agitadores". A mistura em um tanque de carga corresponde, grosso modo, aos sistemas de biodigestores de mistura completa (ver capítulo 3.2.2.1, seção "Técnicas com mistura completa").

Higienização

Sob determinadas circunstâncias, é necessário integrar à usina de biogás um processo de pré-tratamento térmico, para que atenda à conformidade dos

Tabela 3.7: Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos de fragmentação com função de transporte integrada

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • possibilitam fluxos de transporte de até 720 m³/h • altura de transporte de até no máximo 25 m • potência de entrada: 1,7–22 kW
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos bombeáveis compostos de fibras longas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + acesso fácil ao equipamento se houver avarias + em caso de obstruções, pode-se abrir e realizar a manutenção dos equipamentos com facilidade + dispensa equipamentos de transporte adicionais
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - é possível elevar o teor de matéria seca no biodigestor até o ponto em que sua bombeabilidade não seja comprometida - possibilita a fragmentação apenas de uma parte do fluxo de material; o rebombeamento permite aumentar a porção de matéria fragmentada
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • os equipamentos devem ser separados do condutor do substrato por meio de válvula guilhotina • no caso de avaria, pode ser útil realizar um bypass por meio de uma válvula guilhotina • a escolha do método de corte ou dilaceramento condiciona o tamanho das partículas que se pode atingir
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • bomba centrífuga, rotor com arestas cortantes, nas variantes em seco de pé, ou submersível
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • a manutenção de bombas independentes não exige longas paradas; bombas submersíveis podem ser retiradas do substrato com facilidade • aberturas para manutenção reduzem drasticamente os tempos de parada

critérios previstos pela legislação relativos a grupos de substâncias críticos do ponto de vista fitossanitário e epidemiológico. O pré-tratamento se dá pelo aquecimento das substâncias a uma temperatura de 70 °C por no mínimo uma hora. Outro método de extermínio dos germes é a esterilização sob pressão, em que o substrato é pré-tratado por 20 minutos a uma temperatura de 133 °C e sob uma pressão de 3 bar. Essa técnica, no entanto, é bem menos comum que a higienização a 70 °C. Com as dimensões dos recipientes utilizados para a higienização e o gasto de energia dependendo da quantidade processada, a higienização normalmente é feita antes que cossustratos críticos do ponto de vista higiênico sejam carregados no biodigestor. Isso possibilita a higienização apenas das substâncias críticas e, desse modo, o dimensionamento do processo de higienização de forma econômica (higienização parcial do fluxo). Também é possível realizar uma higienização completa do fluxo de substâncias introduzidas ou do material fermentado. Uma das vantagens da higienização localizada antes do biodigestor é que, até certo ponto, o substrato é termicamente decomposto, o que, conforme suas propriedades, facilita a sua fermentação.

A higienização pode ser realizada em tanques de aço, hermeticamente fechados, que permitem o aquecimento. Comumente são utilizados tanques do ramo de tecnologia de rações. A higienização é monitorada e registrada utilizando dispositivos de medição do nível de

enchimento, temperatura e pressão. Após a higienização, a temperatura do substrato é maior que aquela encontrada no interior do biodigestor. Dessa forma, o substrato higienizado presta-se para o preaquecimento de outros substratos ou pode ser introduzido diretamente no biodigestor para aquecê-lo. Se o uso do calor do substrato higienizado for tecnicamente inviável, é necessário o arrefecimento adequado até o nível de temperatura do biodigestor. A figura 3.10 ilustra os tanques de higienização, já a tabela 3.8 contém um resumo das características específicas dos tanques.

Decomposição preliminar aeróbica

Na digestão seca pela técnica de garagem, é possível aerar o substrato antecipadamente, antes do início do processo fermentativo propriamente dito (ver 3.2.2.1 "Tipos de biodigestor"). Os processos de compostagem ativados pela adição de ar são acompanhados do aquecimento do substrato para 40 a 50 °C. Com duração de dois a quatro dias, a decomposição preliminar tem a vantagem de iniciar a quebra celular e permitir o autoaquecimento do material, poupando o biodigestor da necessidade de ter componentes adicionais de aquecimento. Sua desvantagem, no entanto, é que a matéria orgânica já decomposta não está mais disponível para a produção de biogás.

Hidrólise

No processamento monofásico com cargas elevadas, existe o risco de que o sistema biológico no reator entre

Tabela 3.8: Valores característicos e parâmetros operacionais de tanques de higienização

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade: específica do sistema, tanques de higienização com, p. ex., 50 m³ • Aquecimento: interno ou em tanque de parede dupla • Duração: o dimensionamento deve considerar o tempo de uma hora de higienização (a 70 °C) para enchimento, aquecimento e esvaziamento
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • em tanques de higienização comuns, o substrato deve ser bombeável e, conforme a necessidade, receber um pré-tratamento antes da higienização
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • inclusão obrigatória de um dispositivo para o registro do processo de higienização • o substrato quente higienizado não deve ser introduzido diretamente no biodigestor, pois a microbiota não suporta elevadas temperaturas (em fermentação parcial, é possível realizar a mistura direta) • a mistura de material patogênico com material inócuo é inadmissível • conforme o substrato, é possível a ocorrência de depósitos de areia e substâncias pesadas
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • tanques de aço de parede simples com aquecimento interno ou tanques de aço com parede dupla dotada de aquecimento ou com trocadores de calor de contrafluxo • impermeável a gases e conectada à tubulação pendular de gás, ou não impermeável a gases dotada de exaustão do tanque, se necessário, por meio de purificador de ar
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • o tanque deve ter, no mínimo, uma porta de inspeção • observar as normas de segurança durante trabalhos em tanques fechados (respeitar também as normas de segurança para gases) • manutenção necessária conforme os equipamentos instalados (sensores de temperatura, agitadores, bombas); o tanque em si não deve exigir manutenção

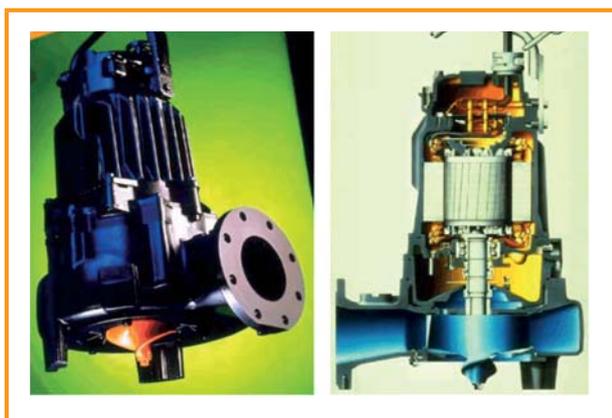


Figura 3.9: bomba submersível com arestas de corte no rotor da unidade de fragmentação e transporte [ITT FLYGT Pumpen GmbH]



Figura 3.10: Higienização com resfriamento [TEWE Elektronik GmbH & Co. KG]

em desequilíbrio, ou seja, que nas fermentações primária e secundária a formação de ácidos ocorra mais rapidamente que a sua oxidação na metanogênese [3-19]. Além disso, a eficiência no uso do substrato decresce com o aumento da carga orgânica volumétrica e dos tempos de retenção curtos. Em casos extremos, pode ocorrer acidificação e colapso do biodigestor. Para contornar esse problema, os processos de hidrólise e de acidificação podem ser realizados antes de atingir o biodigestor, em tanques separados, ou pode-se ter um espaço isolado no interior do biodigestor por meio de estruturas especiais (p. ex. em biodigestores bifásicos). A hidrólise pode ocorrer sob condições aeróbias e anaeróbias e com valores de pH entre 4,5 e 7. Temperaturas de 25 a 35 °C, geralmente suficientes, podem ser elevadas para 55 a 65 °C a fim de proporcionar maior taxa de degradação. Como local de armazenagem, podem ser usados diferentes reservatórios de alimentação (verticais, horizontais) com seus respectivos equipamentos, tais como agitador, capacidade de aquecimento e isolamento. A alimentação de substrato pode ser contínua ou em batelada. Deve-se observar que o gás de hidrólise contém hidrogênio em grande parte. No sistema anaeróbio, a emissão dos gases de hidrólise na atmosfera pode significar perdas energéticas com relação ao volume de biogás gerado. Além do mais, isso representa um problema de segurança, uma vez que a mistura de hidrogênio com ar pode formar uma atmosfera explosiva.

Desintegração

A desintegração é a destruição da estrutura da parede celular e liberação de todo o conteúdo celular, o que aumenta a disponibilidade do substrato para os microrganismos, elevando, por conseguinte, a taxa de decomposição. Para isso, são utilizados processos térmicos, químicos, bioquímicos e físicos/mecânicos para promover a quebra celular. Processos possíveis são a elevação da temperatura até $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sob condições normais de pressão ou $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ em ambiente pressurizado, a hidrólise anteriormente citada, a adição de enzimas, ou, na categoria de métodos mecânicos, a aplicação de desintegração ultrassônica. Os especialistas questionam a eficiência desses processos. Por um lado, a eficácia de cada um dos processos depende, em grande parte, do substrato e da forma como foi preparado. Por outro lado, todos os processos exigem energia adicional, seja ela elétrica ou térmica, o que se contrapõe diretamente ao possível ganho de eficiência. Antes de integrar processos desse tipo, deve-se realizar testes e análises adicionais do substrato tratado, a fim de se estimar o ganho efetivo desse estágio de desintegração, embasando tal avaliação do ponto de vista econômico e considerando os ganhos e perdas financeiros.

3.2.1.4 Transporte e carregamento

Do ponto de vista dos processos biológicos, a situação ideal para se obter um processo fermentativo estável é que o fluxo de substrato seja contínuo. Como isso raramente pode ser observado na prática, a regra é que o carregamento de substrato no biodigestor se dê de maneira semicontínua. A adição do substrato se dá em várias cargas ao longo do dia. Em consequência disso, os equipamentos utilizados no seu transporte não operam continuamente. Isso é de suma importância no dimensionamento dos componentes.

A constituição do substrato é um fator essencial na determinação da tecnologia adotada para o seu transporte e carregamento, de modo que substratos bombeáveis e empilháveis exigem diferentes tipos de equipamentos.

No seu carregamento no biodigestor, deve-se prestar especial atenção à temperatura do substrato. Diferenças muito grandes na temperatura do material e do biodigestor, por exemplo, no carregamento após o estágio de higienização, ou durante o inverno, influenciam fortemente a biologia do processo e reduzem a produção de gás. Em alguns casos, adotam-se soluções técnicas, como trocadores de calor e tanques de carga aquecidos.

Transporte de substrato bombeável

O transporte de substratos bombeáveis na usina de biogás se dá, principalmente, por meio de bombas movidas a motores elétricos. As bombas podem ser controladas por temporizadores ou computadores, permitindo automatizar o processo parcial ou completamente. Em muitos casos, todo o transporte do substrato na usina é realizado de forma centralizada, por uma ou duas bombas localizadas em uma cabine de controle ou estação de bombas. A colocação da tubulação se dá de forma que todas as situações operacionais – tais como alimentação, esvaziamento completo dos tanques, avarias, entre outras – possam ser controladas por meio de válvulas guilhotina de fácil acesso. A figura 3.11 mostra um exemplo de instalação de bombas e tubulação em uma usina de biogás.

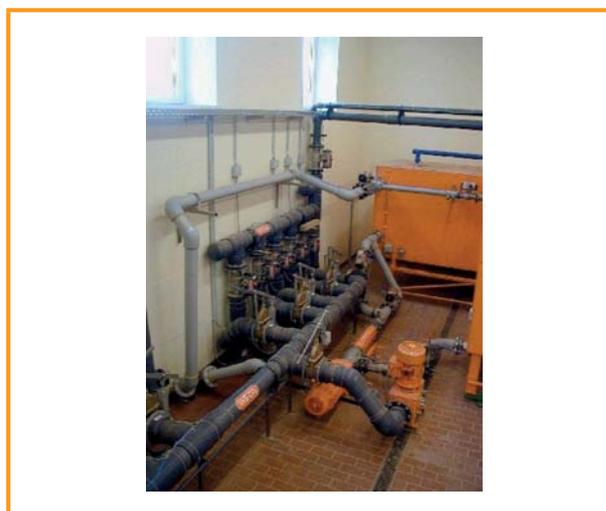


Figura 3.11: Bombas em uma usina de biogás [WELtec BioPower GmbH]

Deve-se assegurar que as bombas sejam facilmente acessíveis e à volta delas seja deixado suficiente espaço para o trabalho. Apesar das medidas preventivas e da boa preparação do substrato, existe a possibilidade de entupimento das bombas, o que deve ser rapidamente reparado. Outro aspecto importante é o fato de as peças móveis das bombas sofrerem desgaste. Elas estão sujeitas a elevados esforços e necessitam ser substituídas sem que a usina cesse o seu funcionamento. Por essa razão, as bombas devem dispor de válvulas de gaveta, para que possam ser desligadas da rede de fornecimento antes dos trabalhos de manutenção. As usinas se servem quase exclusivamente de bombas de deslocamento positivo ou bombas centrífugas, adotadas também nos equipamentos de processamento de esterco líquido.



A escolha das bomba adequadas, no que se refere à potência e características de transporte, depende, em grande parte, dos substratos utilizados e de seu grau de preparo ou teor de matéria seca. Para proteger o equipamento, à frente das bombas podem ser instalados unidades de corte e trituração e separadores de corpos estranhos, ou pode-se optar por bombas cujos elementos de deslocamento são equipados com dispositivos de trituração.

Bombas centrífugas

O uso de bombas centrífugas é amplamente difundido nos equipamentos de processamento de esterco líquido, sendo especialmente apropriadas para substratos líquidos. Esse modelo de bomba é composto de uma carcaça fixa dotada de um rotor. O meio a ser deslocado é acelerado com o auxílio do rotor, e no bico de pressão da bomba centrífuga o aumento de velocidade resultante é convertido em altura manométrica, i.e., pressão de bombeamento. Conforme os requisitos, o rotor pode ter diferentes tamanhos e formas. Um dos tipos especiais é a bomba com anel triturador (ver figura 3.9), cujo rotor é dotado de arestas cortantes para triturar o substrato. Valores característicos e parâmetros operacionais se encontram na tabela 3.9.

Bombas de deslocamento positivo

As bombas de deslocamento positivo encontram aplicação no transporte de substratos viscosos com ele-

vado teor de matéria seca. Nessas bombas, a quantidade transportada é determinada pela velocidade de rotação. Essa característica alia o melhor grau de controle à exatidão na dosagem do substrato. Elas são autoaspirantes e apresentam pressão mais estável que as bombas centrífugas, o que faz com que o fluxo volumétrico dependa menos da altura manométrica. Em virtude de as bombas de deslocamento positivo serem relativamente suscetíveis a materiais estranhos, recomenda-se proteger a bomba contra elementos fibrosos ou de maiores dimensões, com equipamentos de fragmentação e separadores de materiais.

São utilizadas, principalmente, bombas de lóbulos e bombas de cavidade progressiva. **Bombas de cavidade progressiva** possuem um rotor, em forma de saca-rolhas, que gira em um estator de material elástico. O giro do rotor origina um espaço oco em movimento, no qual o substrato é transportado. A figura 3.12 contém um exemplo. Valores característicos e parâmetros operacionais se encontram na tabela 3.10.

A **bomba de lóbulos** é alojada em uma carcaça oval e possui dois pistões rotativos girando em direções contrárias, cada um composto de dois a seis lóbulos. Os dois pistões rolam um sobre o outro com pouca folga axial e radial, sem encostar entre si nem tocar a carcaça, e são construídos de forma que, em qualquer posição, a câmara de sucção seja bloqueada pela de pressão. No transporte, os espaços originados na câmara de sucção são preenchidos com o meio bombeado, e este é transportado para a linha de recalque. O princípio de fun-

Tabela 3.9: Valores característicos e parâmetros operacionais de bombas centrífugas [3-1]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • pressão de bombeamento: até 20 bar (na prática, a pressão de bombeamento é, em geral, inferior) • fluxo volumétrico entre 2 m³/min e 30 m³/min • potência de entrada: p. ex. 3 kW a 2 m³/min, 15 kW a 6 m³/min, em forte dependência do substrato • geralmente para substratos com < 8% de conteúdo de MS
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos de baixa viscosidade com baixos conteúdos de matéria seca, pequenas quantidades de palha permitidas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + construção mais fácil, compacta e robusta + elevada vazão + flexibilidade das aplicações (também como bomba submersível)
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - não é autoaspirante, é necessário ser instalada abaixo do substrato a bombear, p. ex. em um poço - não adequadas para a dosagem de substrato
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • a vazão é fortemente influenciada pela pressão de bombeamento e altura manométrica
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • como bomba submersível ou bomba instalada em local seco; também pode ser fornecida como bomba com função de fragmentação; disponível como bomba submersível com acionamento sob ou sobre a superfície do substrato
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • mais difícil em bombas submersíveis, mas relativamente de fácil acesso por aberturas de descarga • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor • interrupções da operação são ligeiramente mais longas que com outros tipos de bombas

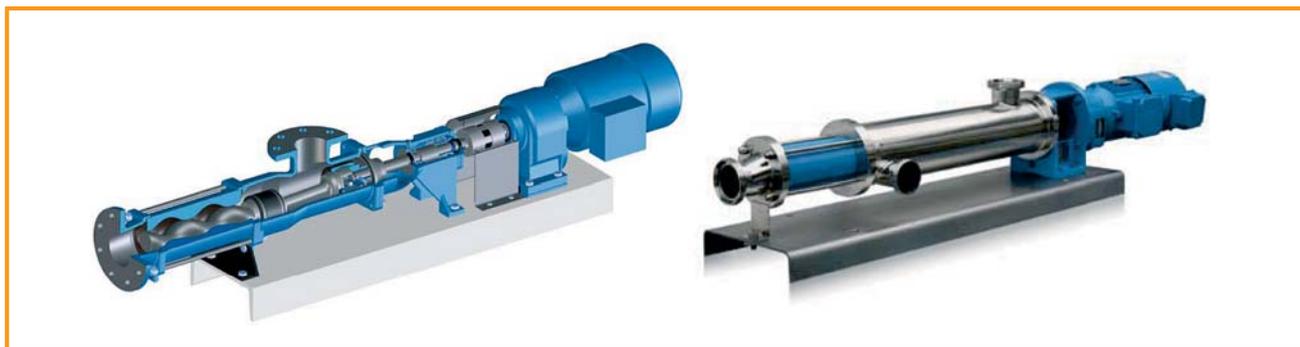


Figura 3.12: Bomba de cavidade progressiva [LEWA HOV GmbH + Co KG]

Tabela 3.10: Valores característicos e parâmetros operacionais de bombas de cavidade progressiva

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • pressão de bombeamento: até 48 bar • fluxo volumétrico entre 0,055 m³/min e 8 m³/min • potência de entrada: p. ex. 7,5 kW a 0,5 m³/min; 55 kW a 4 m³/min; depende fortemente do substrato
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos viscosos bombeáveis com quantidade reduzida de material estranho e substâncias de fibras longas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + elevado poder de sucção + construção simples e robusta + permitem a dosagem de substrato + sentido de rotação inversível
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - capacidades de vazão menores que as das bombas centrífugas - sensível à operação a seco - sensível a materiais estranhos (pedra, substâncias com fibras longas, metais)
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • a vazão é fortemente influenciada pela viscosidade; bombeamento estável na presença de oscilações de pressão • aceita a instalação de dispositivo contra operação a seco • amplamente utilizada em estações de tratamento de águas residuais • em geral, possibilita o ajuste do estator conforme a vazão, o substrato e o desgaste • permite configuração especial com mudança da direção de transporte
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • como bomba para instalação em local seco
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • alta durabilidade • fácil manutenção em virtude de sua construção; o sistema de troca rápida de fuso permite curtas interrupções na operação

cionamento da bomba de lóbulos se encontra ilustrado na figura 3.13. Os valores característicos e os parâmetros operacionais se encontram resumidos na tabela 3.11.

Transporte de substratos empilháveis

Na digestão úmida, substratos empilháveis devem ser transportados até o ponto de carregamento ou até a mistura. A maior parte do percurso é realizada com um carregador convencional. Somente na alimentação automática é que são utilizadas esteiras rolantes, barras de empurramento e transportadores helicoidais. Esteiras rolantes e barras de empurramento são capazes de transportar, horizontalmente ou em leve active, praticamente qualquer tipo de substrato empilhável. Não podem, porém, ser utilizadas para dosagem. Elas permi-

tem a utilização de reservatórios de alimentação grandes. Transportadores helicoidais transportam substratos empilháveis em quase todas as direções, exigindo apenas que o substrato seja isento de pedras grandes, esteja suficientemente fragmentado para que caiba na espiral da rosca e possa ser por ela transportado. Sistemas automáticos de alimentação de substrato empilhável são comumente combinados a equipamentos de carregamento, formando uma unidade na usina de biogás.

Nas conhecidas usinas de digestão de sólidos tipo garagem, os substratos empilháveis são movidos exclusivamente com carregadeiras ou diretamente por reboques equipados com piso móvel ou equipamento semelhante.

Tabela 3.11: Valores característicos e parâmetros operacionais da bomba de lóbulos

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • pressão de bombeamento: até 12 bar • para fluxos volumétricos entre 0,1 m³/min e cerca de 16 m³/min • potência de entrada: cerca de 2 a 55 kW
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos viscosos bombeáveis
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + construção simples e robusta + autoaspirante até 10 m de coluna de água + permitem a dosagem de substrato + têm capacidade para transportar material estranho e fibroso de maiores dimensões que a bomba de cavidade progressiva + não sensível à operação a seco + exige pouco espaço + fácil manutenção + recurso de mudança da direção do transporte de fábrica
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • elevada velocidade de rotação, de até 1.300 RPM, é ideal para a otimização do desempenho • meias-luas ajustáveis otimizam a eficiência e os intervalos de manutenção pela diminuição da folga
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • como bomba para instalação em local seco
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • fácil, em função da construção; exige somente breves interrupções na operação

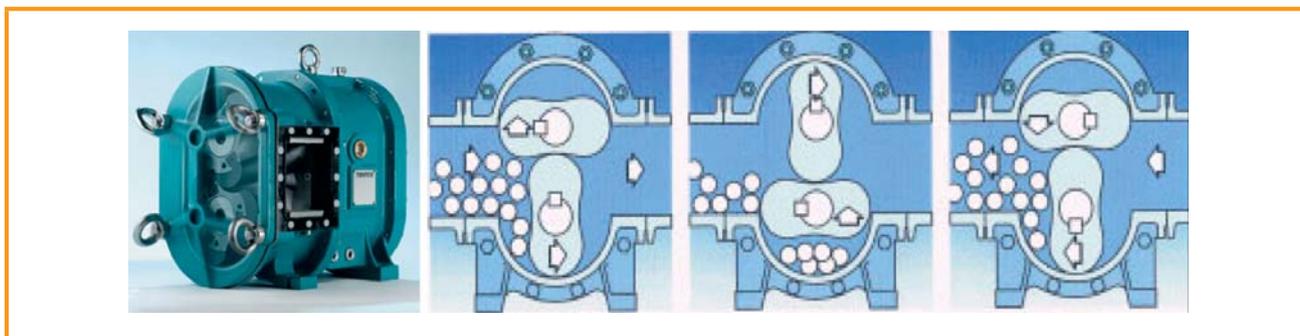


Figura 3.13: Bomba de lóbulos (esquerda), princípio de bombeamento do pistão rotativo (direita) [Börger GmbH (esquerda), Vogelsang GmbH]

Carregamento do substrato bombeável

Substratos bombeáveis normalmente são depositados em tanques de carga de concreto impermeáveis, localizados no solo, nos quais o esterco líquido acumulado é armazenado e homogeneizado. Os tanques de carga devem ser dimensionados para armazenar uma quantidade suficiente para abastecer a usina durante um a dois dias. Frequentemente são utilizadas as esterqueiras existentes na propriedade agrícola. Se a usina não permitir uma forma de alimentação separada e direta de cossustratos, no tanque de carga os substratos empilháveis também são misturados, fragmentados, homogeneizados e, quando necessário, submetidos à mistura para originar um material bombeável (ver seção "Alimentação indireta pelo tanque de carga"). O resumo dos dados característicos de tanques de carga se encontra na tabela 3.12, e um exemplo é ilustrado pela figura 3.14.

Também é possível alimentar o biodigestor, ou os reservatórios de alimentação, com substratos ou cossustratos líquidos, por meio de bocais padronizados. Nesse caso, o reservatório de alimentação deve ser adaptado às características do substrato. Entre as especificações exigidas, destacam-se o uso de materiais quimicamente resistentes, a possibilidade de aquecimento, dispositivos de mistura e coberturas impermeáveis a gases e para a mitigação de odores.

Carregamento de substratos empilháveis

A introdução de sólidos no biodigestor pode se dar direta ou indiretamente. Na introdução indireta, os substratos empilháveis passam pelo tanque de carga ou pelo condutor do substrato antes de atingirem o biodigestor (ver figura 3.15). A introdução direta de sólido dispensa a etapa de mistura no tanque de carga ou no condutor de líquido, permitindo a colocação do substrato diretamente no biodigestor (ver figura 3.16).

Tabela 3.12: Valores característicos e parâmetros operacionais dos tanques de carga

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • confeccionados em concreto impermeável, geralmente de concreto armado • devem ter capacidade para uma quantidade de substrato suficiente para um a dois dias de operação
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos bombeáveis e misturáveis • compatível também com substratos empilháveis, se utilizado equipamento de fragmentação
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • permite boa homogeneização e mistura do substrato • formação de camadas de sedimentos de pedras • poço de bombeamento, fossa de coleta ou mecanismos de raspagem devem permitir a retirada de camadas de sedimentos • recomenda-se a cobertura do tanque de carga para evitar a emissão de odores • o carregamento de sólidos pode ocasionar obstruções, sobrenadante e sedimentação
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • tanques e reservatórios circulares ou retangulares, no nível do solo ou elevados, cujo acesso para o enchimento pode ser alcançado por uma carregadeira • tanques localizados em posição mais alta que o biodigestor têm a vantagem de dispensar o uso de equipamentos de transporte, em função do desnível hidráulico • a recirculação pode ser realizada com equipamentos semelhantes aos utilizados nos biodigestores
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • exige a remoção manual da camada de sedimentos na ausência de meios de retirada dessa camada • além disso, quase não exige manutenção; a manutenção dos equipamentos técnicos é descrita nos respectivos capítulos

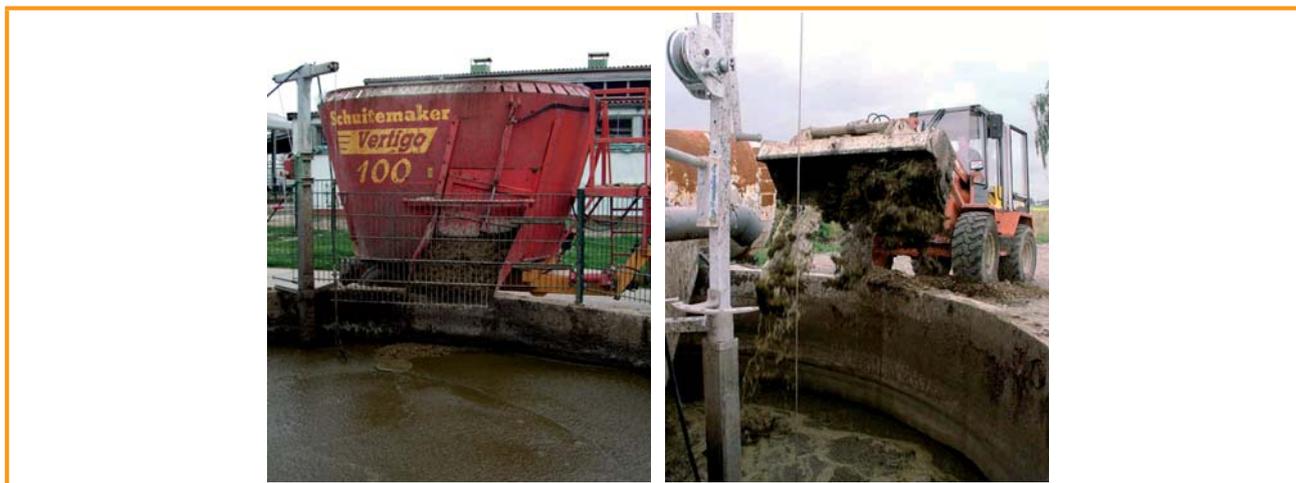


Figura 3.14: Enchimento do tanque de carga e alimentação [Paterson, FNR; Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH]

Assim, é possível aplicar cossustratos em intervalos regulares, independentemente do esterco [3-8]. Também é possível aumentar o conteúdo da matéria seca no biodigestor, elevando a produtividade do biogás.

Alimentação indireta pelo tanque de carga

Caso a usina de biogás não disponha de um acesso separado para o carregamento de cossustratos, os substratos empilháveis são misturados, fragmentados e homogeneizados no tanque de carga e, se necessário, submetidos à mistura para a obtenção de consistência bombeável. Por essa razão, os tanques de carga são equipados com agitadores e, nos casos em que a fragmentação do substrato se fizer necessária, ferramentas de corte e dilaceramento. No processamento de substratos contendo material estranho, o tanque de

carga assume também a função de separar pedras e camadas de sedimentos. Por meio de esteiras rolantes e transportadores helicoidais, esses materiais podem ser concentrados e retirados [3-3]. Caso o tanque de carga tenha de ser coberto para evitar a emissão de maus odores, a cobertura deve ser realizada de tal forma a não impedir a abertura do tanque para a retirada de substâncias sedimentadas.

O enchimento se realiza, por exemplo, por meio de carregadeiras ou outros equipamentos móveis, bem como por sistemas automatizados de carregamento de matéria sólida. A alimentação do biodigestor com a mistura de matéria líquida e sólida se dá por meio de bombas adequadas. O resumo dos dados característicos de tanques de carga se encontra na tabela 3.12, e um exemplo é ilustrado pela figura 3.14.

Introdução indireta no fluxo de líquido

Além da introdução pelo tanque de carga, existe a opção de inserir, no fluxo de líquido, substratos sólidos, tais como resíduos orgânicos, silagem e esterco, utilizando unidades de dosagem adequadas, como bombas dotadas de tremonha (ver figura 3.17). A introdução pode ocorrer pela compressão no condutor do substrato ou por fluxo direto da unidade de alimentação. Durante a introdução do substrato, pode ocorrer fragmentação grossa. A potência do equipa-

mento de introdução pode ser ajustada conforme o teor de matéria seca e a quantidade de substrato a ser introduzida. Pode-se utilizar como fluxo de líquido o esterco de um tanque de carga/reservatório, ou o substrato de um equipamento de fermentação ou de depósitos de biofertilizantes. Sistemas desse tipo também são utilizados em usinas de biogás médias a grandes, uma vez que a construção modular permite flexibilidade e maior tolerância a falhas [3-17].

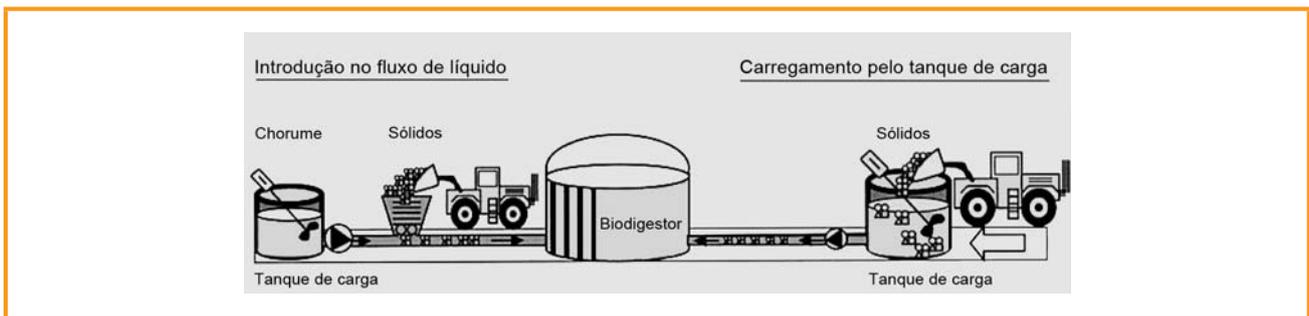


Figura 3.15: Introdução indireta de substrato sólido (esquema) [3-1]

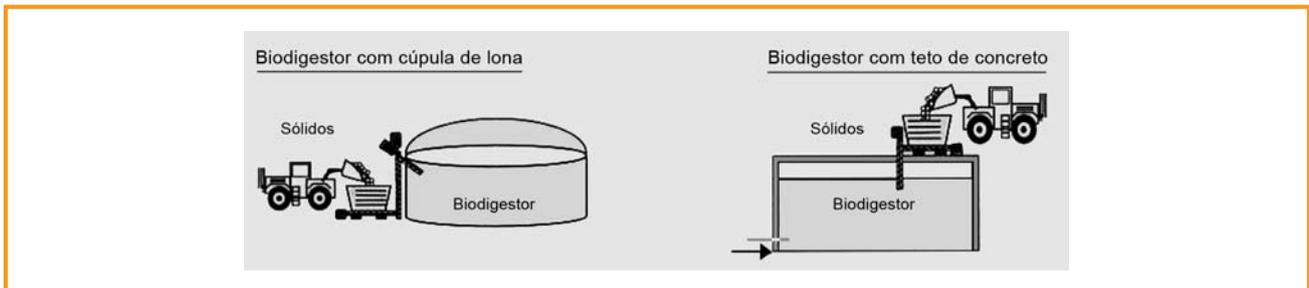


Figura 3.16: Introdução direta de substrato sólido (esquema) [3-1]



Figura 3.17: Bombas dotadas de tremonha com bomba de lóbulos integrada (esquerda) e bomba de cavidade progressiva (direita) [Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH (esquerda), Netzsch Mohnpumpen GmbH]

Tabela 3.13: Características de bombas dotadas de tremonha para a introdução de sólidos em fluxos líquidos

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • pressão de bombeamento: até 48 bar • fluxo volumétrico da suspensão: 0,5-1,1 m³/min (conforme o tipo de bomba e a suspensão a ser deslocada) • fluxo volumétrico de sólidos: aprox. 4-12 t/h (alimentação por rosca dupla com fragmentação)
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos pré-fragmentados e em grande parte livres de materiais estranhos
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + elevada capacidade de sucção e recalque + construção robusta; opção com proteção contra desgaste + adequada para a dosagem + opção com fragmentação por mecanismo de dilaceramento nas roscas de alimentação
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - em parte, sensível a materiais estranhos (pedras, substâncias com fibras longas, partes de metal)
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • fragmentação, agitação e mistura em um só passo • alimentação de sólidos personalizável (por carregadeira, dispositivos de transporte e unidades de alimentação) • alimentação da fase líquida por bomba independente
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • como componente instalado em local seco • alimentação do substrato, com rosca de transporte simples ou dupla, para o fluxo de líquido/bomba; roscas, em parte dentadas, para a fragmentação de substrato • bombas preferenciais: bomba de pistão rotativo e de cavidade progressiva; em parte, integrada em bomba dotada de tremonha
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • fácil manutenção em virtude da construção; exige somente breves interrupções na operação



Figura 3.18: Carregamento de biomassa empilhável com pistão de alimentação [PlanET Biogastechnik GmbH]

As características essenciais dos sistemas de alimentação indireta se encontram na tabela 3.13.

Introdução direta por meio de pistão de alimentação

No carregamento por meio de pistão de alimentação, os substratos são comprimidos, por um pistão hidráulico, diretamente para o interior do biodigestor, através de uma abertura na sua parede, localizada próxima ao fundo do biodigestor. A introdução próxima ao solo faz com que o substrato se misture ao esterco líquido, redu-

zindo com isso a formação de sobrenadante. O sistema é equipado com rolos misturadores, que se movimentam um contra o outro empurrando o substrato para o cilindro localizado abaixo deles e, ao mesmo tempo, fragmentando as fibras longas [3-1]. O sistema de introdução é normalmente combinado a um reservatório de alimentação ou se encontra instalado abaixo dele. Os valores característicos dos pistões de alimentação estão na tabela 3.14. O equipamento é ilustrado pela figura 3.18.

Tabela 3.14: Valores característicos e parâmetros operacionais de pistões de alimentação

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • geralmente confeccionada em aço inoxidável; pistões alojados em carcaça fechada • introdução no biodigestor: horizontal; opção de adição também pelo fundo do biodigestor • válvula automática e manual necessária para o caso de o nível do biodigestor exceder a borda superior do reservatório de alimentação
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os cossustratos empilháveis comuns; conforme a configuração de roscas do equipamento, comporta também material pedregoso e de fibras longas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + baixo nível de odores + ótima capacidade de dosagem + automatizável
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - risco de formação de camada de sedimentos no biodigestor em virtude da compactação do substrato comprimido, o que dificulta o acesso dos microrganismos no biodigestor - permite apenas o transporte horizontal do substrato - somente um biodigestor pode ser alimentado pelo reservatório
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • a alimentação deve ser impermeável a líquidos • a altura e o volume de enchimento devem ser compatíveis com o equipamento de enchimento em operação • opção de fragmentação da massa pressionada compactada por faca quádrupla, recomendável por causa do risco de compactação • espaço disponível ao lado do biodigestor • possibilidade de dosagem pelos pistões em função do peso da instalação de equipamento de pesagem no reservatório de alimentação
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • pistão hidráulico com transportador helicoidal com tração hidráulica ou elétrica • flexibilidade na combinação com diferentes sistemas de alimentação, tais como tremonha de alimentação, container com piso móvel, vagão forrageiro, etc.
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • manutenção periódica em função das peças móveis do equipamento • a manutenção do pistão implica interrupções consideráveis do processo, eventualmente exigindo o esvaziamento do biodigestor



Figura 3.19: Carregamento de biomassa empilhável com transportador helicoidal [DBFZ]

Alimentação direta por meio de transportador helicoidal

Na alimentação com transportadores helicoidais e roscas de alimentação, o substrato é pressionado por meio de roscas de pressão sob o nível do líquido no biodigestor. Isso garante que nenhum gás escape pela saída do transportador. Na variante mais simples, a dosadora se encontra sobre o biodigestor, sendo necessário apenas um transportador vertical para a alimentação. Em caso

contrário, a altura do biodigestor tem de ser vencida por meio de transportadores helicoidais inclinados. A alimentação pelo transportador helicoidal pode ser realizada com qualquer reservatório de alimentação, podendo esse ser dotado de mecanismos de fragmentação [3-8]. Os valores característicos de sistemas de alimentação com transportadores helicoidais se encontram na tabela 3.15. A figura 3.19 ilustra o equipamento.

Tabela 3.15: Valores característicos e parâmetros operacionais de transportadores helicoidais de alimentação

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • geralmente confeccionados em aço inoxidável; alojados em carcaça fechada • introdução no biodigestor: horizontal, vertical ou oblíqua por cima • alimentação ligeiramente abaixo do nível do líquido • válvula automática e manual necessária para o caso de o nível do biodigestor exceder a borda superior do reservatório de alimentação
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os cossustratos empilháveis comuns, com pedras de dimensões inferiores à espiral da rosca • transporte de substratos triturados; eventual dificuldade em processar substratos de fibras longas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + a direção de transporte é irrelevante + automatizável + cada reservatório tem capacidade de alimentar vários biodigestores (p. ex. por meio de transportador helicoidal inclinado, com distribuição por duas roscas de pressão)
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - atrito com as carcaças do transportador e com as roscas - sensível a pedras maiores e outros materiais estranhos (conforme as dimensões da espiral da rosca)
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • possibilita o transporte de substratos misturados • evita o escapamento de gás dos transportadores • possibilidade de dosagem pelos transportadores em função do peso mediante a instalação de equipamento de pesagem no reservatório de alimentação • espaço disponível ao lado do biodigestor • a altura e o volume de enchimento devem ser compatíveis com o equipamento de enchimento em operação
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • rosca de pressão conecta o reservatório de alimentação e o biodigestor na vertical, horizontal ou diagonal • transportador helicoidal inclinado para vencer a altura do biodigestor (transporte vertical) • flexibilidade na combinação com diferentes sistemas de alimentação, tais como tremonha de alimentação, container com piso móvel, vagão forrageiro, etc.
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • manutenção periódica em função das peças móveis do equipamento • obstruções e material estranho emperrado devem ser eliminados manualmente • a manutenção do transportador helicoidal que leva o substrato para o biodigestor pode significar severas interrupções do processo

Transformação da biomassa em pasta

Os cossustratos, tais como a beterraba, são preparados com equipamentos de fragmentação de uso comum no processamento de beterrabas, conferindo-lhes uma consistência bombeável. O teor de matéria seca restante monta até a 18%. Os substratos liquefeitos são armazenados em reservatórios adequados e, sem passar pelo tanque de carga, são bombeados diretamente para o biodigestor, como descrito na seção "Transporte e carregamento". Se o substrato-base utilizado for o esterco líquido, esse procedimento permite manter o conteúdo de massa seca no biodigestor em níveis reduzidos [3-8].

Calhas de alimentação

Calhas de alimentação se destacam pela robustez e são uma forma simples de introduzir substratos no biodigestor, o que pode ser feito por uma carregadeira, permitindo o reabastecimento de grandes quantidades de substrato em pouco tempo. Por ser barata e não exigir manutenção, essa técnica ainda é encontrada em usinas antigas de pequeno porte. Como a calha se encontra conectada diretamente ao biodigestor,

essa técnica pode resultar em fortes odores e escapamento de metano, não sendo, portanto, mais adotada na construção de novas usinas [3-17].

Carregamento de substratos empilháveis na fermentação a seco (princípio de garagem)

O biodigestor de baixa dispensa a alimentação automática, em função da sua facilidade de acesso. Além da alimentação, o esvaziamento também se dá por meio de equipamentos agrícolas convencionais, geralmente por carregadeira.

Válvulas e tubulações

As guarnições e tubulações devem ser resistentes à corrosão e à ação de substâncias. Guarnições, como acoplamentos, válvulas de gaveta, válvulas de retenção, aberturas para limpeza e manômetro, têm de estar em posição bem acessível, ser de fácil operação e instaladas de forma a não sofrer congelamento. Os "Preceitos de Segurança para Usinas de Biogás", da entidade de classe profissional agrícola, contém informações sobre exigências quanto às tubulações e guarnições e podem servir de auxílio no cumprimento da

Tabela 3.16: Valores característicos de guarnições e tubulações de líquidos

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> material da tubulação: PVC, PEAD, aço ou aço inoxidável, conforme a carga do meio e o nível de pressão conexões flangeadas, soldadas ou coladas tubulações de pressão com diâmetro de 150 mm; tubulações sem pressão (refluxo ou ladrão) com diâmetro de 200 – 300 mm conforme o substrato todos os materiais devem ser quimicamente resistentes ao substrato e suportar a pressão máxima de bombeamento (tubulação de pressão)
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> válvulas gaveta com cunha são bastante estanques, mas sensíveis a material estranho válvulas com lâminas cortam substâncias fibrosas utilização de fechos rápidos de cabeça esférica para conexões de tubos desencaixáveis eliminar o risco de congelamento em todas as guarnições e tubulações; instalar isolamento no caso de substratos quentes colocação da tubulação com inclinação de 1% – 2% para permitir esvaziamento evitar o refluxo de substrato do biodigestor para o tanque de carga pela correta instalação da tubulação na colocação de tubulação no solo, observar a estanqueidade antes da instalação instalar válvulas guilhotina antes das válvulas de retenção, para o caso de impossibilidade de fechamento da válvula de retenção em função de material estranho tubulações de ferro fundido são inadequadas, pois tendem a acumular mais resíduos que tubos de plástico com parede lisa

Tabela 3.17: Valores característicos de guarnições e tubulações de gases

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> material da tubulação: PEAD, PVC, aço ou aço inoxidável (não utilizar tubos de cobre e demais metais não ferrosos!) conexões flangeadas, soldadas, coladas ou parafusadas
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> garantir que todas as guarnições e tubulações não estejam sujeitas ao congelamento sempre instalar os tubos inclinados, a fim de evitar a acumulação indesejada de condensados (risco de entupimento) possibilidade de purgar o condensado de toda a tubulação de gás; drenagem via condensado todas as válvulas devem ser bem acessíveis, ser de fácil manutenção e poder ser operadas de uma posição segura ao assentar a tubulação no solo, observar a estanqueidade antes da instalação, a colocação sem tensões e utilizar compensadores ou cotovelos de 180° conforme necessário



Figura 3.20: Tubulações e válvulas em uma estação de bombeamento, válvulas de gaveta [DBFZ]

legislação e das normas técnicas, no que tange às características de material, precauções de segurança e inspeções de estanqueidade visando à operação segura da usina de biogás [3-18]. Deve existir a possibilidade de purgar o condensado em todos os segmentos da tubulação de gás, e a declividade da tubulação

deve ser tal que pequenos afundamentos não originem pontos de topo não previstos na tubulação. Isso se provou ser um fator de extrema importância. Em virtude das baixas pressões no sistema, pequenas quantidades de água condensada já são suficientes para ocasionar entupimento total da tubulação. Os va-



Figura 3.21: Plataforma de trabalho entre dois reservatórios com tubulação e dispositivos de alívio de pressão (esquerda); tubulação de gás com soprador compressor (direita) [MT-Energie GmbH (esquerda), DBFZ (direita)]

Tabela 3.18: Características de biorreatores com mistura completa; conforme [3-1] e [3-3]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • permitem dimensões para capacidades de até 6.000 m³, embora maiores dimensões signifiquem maior complexidade técnica no controle de processos e na agitação • normalmente confeccionados em aço ou concreto
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • praticamente todos os tipos de substrato, preferencialmente os bombeáveis com teor de matéria seca médio ou baixo • os equipamentos de transporte e agitação devem ser adaptados ao substrato • recirculação em caso de digestão única de biomassa dedicada • adequados para alimentação contínua, semicontínua e descontínua
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + arquitetura de baixo custo em reatores com volume superior a 300 m³ + operação variável entre regime de fluxo contínuo ou regime combinado de fluxo contínuo e armazenamento + conforme o tipo dos equipamentos, sua manutenção pode ser realizada sem exigir o esvaziamento do biodigestor
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - como curtos-circuitos são possíveis e até prováveis, não é possível afirmar com certeza o tempo de retenção - possibilidade de formação de sobrenadante e de sedimentos
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • recomenda-se a retirada de alguns tipos de substrato com esteira rolante e transportador helicoidal para extração (p. ex. esterco de galinha, em virtude do cálcio sedimentado)
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • reservatórios cilíndricos enterrados verticalmente ou acima do solo • os equipamentos de agitação devem ter potência elevada; se o substrato da fermentação for unicamente o esterco líquido, pode-se utilizar recirculação pneumática através da injeção do biogás • técnicas de recirculação: agitadores com motor submersível no interior do reator, agitador axial em tubo guia vertical, recirculação hidráulica com bombas externas, recirculação pneumática por injeção de biogás em tubo guia vertical, recirculação pneumática por injeção de biogás difusa por orifício na base do reator
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • entrada facilitada por porta de inspeção

lores característicos mais importantes das tubulações de gás e líquido se encontram nas tabelas 3.16 e 3.17. As figuras 3.20 e 3.21 ilustram o equipamento.

3.2.2 Geração de biogás

3.2.2.1 Tipos de biodigestor

O tipo de biodigestor adotado está intimamente ligado ao seu processo de fermentação. Na digestão de substrato, podem ser utilizados os processos de mistura completa, a técnica de fluxo pistonado ou processos especiais.

Tabela 3.19: Características de biorreatores com técnica do fluxo pistonado; conforme [3-1] e [3-3]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • dimensões: biodigestores horizontais até 800 m³, biodigestores verticais até aprox. 2.500 m³ • material: normalmente de aço ou aço inoxidável, também concreto armado
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • digestão úmida: adequada para substratos bombeáveis com elevado teor de matéria seca • digestão seca: os equipamentos de transporte e agitação devem ser adaptados ao substrato • destinados à alimentação semicontínua e contínua
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + construção compacta e de baixo custo em usinas pequenas + separação dos estágios de digestão no fluxo pistonado + sobrenadantes e camadas de sedimentação evitados em função da arquitetura + cumprimento dos tempos de retenção pela eliminação de curtos-circuitos + tempos de retenção curtos + arquitetura compacta permite perda de calor reduzida e aquecimento eficiente + digestão úmida: podem ser utilizados agitadores potentes, confiáveis e que proporcionam economia de energia
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - os tanques exigem espaço - não há inoculação do material fresco, ou ela deve ser realizada pela recirculação de biofertilizantes - a construção é rentável somente em dimensões menores - trabalhos de manutenção no agitador exigem o esvaziamento completo do biorreator
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • reator de fluxo pistonado com seção transversal circular ou retangular • podem ser fabricados na horizontal ou na vertical; é comumente utilizada a variante horizontal • na arquitetura em pé, a técnica do fluxo pistonado é implementada normalmente com construções verticais, raramente horizontais • podem ser operados com ou sem agitadores
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • equipados com aberturas para todos os tubos e equipamentos • deve ser instalada uma válvula de sobrepressão no gasômetro por questões de segurança
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • deve haver, no mínimo, uma porta de inspeção para permitir o acesso ao reator em caso de avaria • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor

Processo com mistura completa

A geração de biogás na agricultura utiliza, principalmente, reatores de mistura completa cilíndricos em posição vertical, perfazendo atualmente (2009) cerca de 90% do total de usinas. Os biodigestores se compõem de um reservatório com fundo de concreto e paredes de aço ou concreto armado. O reservatório pode ser parcial ou totalmente enterrado, ou ser posicionado completamente sobre o solo.

Sobre o reservatório é montada uma cobertura impermeável a gás, que pode ser construída de diferentes formas, conforme as exigências. São utilizados normalmente tetos de lona e concreto. A mistura completa é realizada por agitadores posicionados no interior do reator ou ao lado dele. As características específicas são mostradas na tabela 3.18. A seção transversal do biodigestor é mostrada na figura 3.22. O capítulo 3.2.2.3 descreve detalhadamente os diferentes tipos de agitadores.

Técnica do fluxo pistonado

Usinas de biogás que operam com fluxo em pistão ou pistonado – na digestão úmida denominada, também, usina de fluxo em tanque – tiram proveito do efeito de recalque do substrato fresco, introduzido para produ-

zir um fluxo em forma de pistão através de um biodigestor com seção transversal circular ou retangular. De forma geral, a agitação no sentido do fluxo é realizada por eixos com palhetas ou por uma canalização de fluxo especialmente construída para tal. A tabela 3.19 contém as características desse tipo de usina.

Os biodigestores de fluxo pistonado se dividem, fundamentalmente, em horizontais e verticais. A agroindústria utiliza quase que exclusivamente a variante horizontal. Biodigestores verticais que operam sob o princípio do fluxo pistonado são, atualmente, de ocorrência isolada e não serão discutidos neste manual. As figuras 3.23 a 3.25 mostram o esquema de construção, com exemplos das digestões seca e úmida.

Os tanques de biodigestão, principalmente os horizontais e de aço, são confeccionados na fábrica e, então, fornecidos. O transporte do tanque até o local de uso, no entanto, só é possível até um determinado tamanho. O tanque pode ser utilizado como biodigestor principal para pequenas usinas ou como pré-digestor em usinas maiores, dotadas de digestor principal com mistura completa (reservatório circular). Biodigestores horizontais também são operados em paralelo, visando a maiores produções.

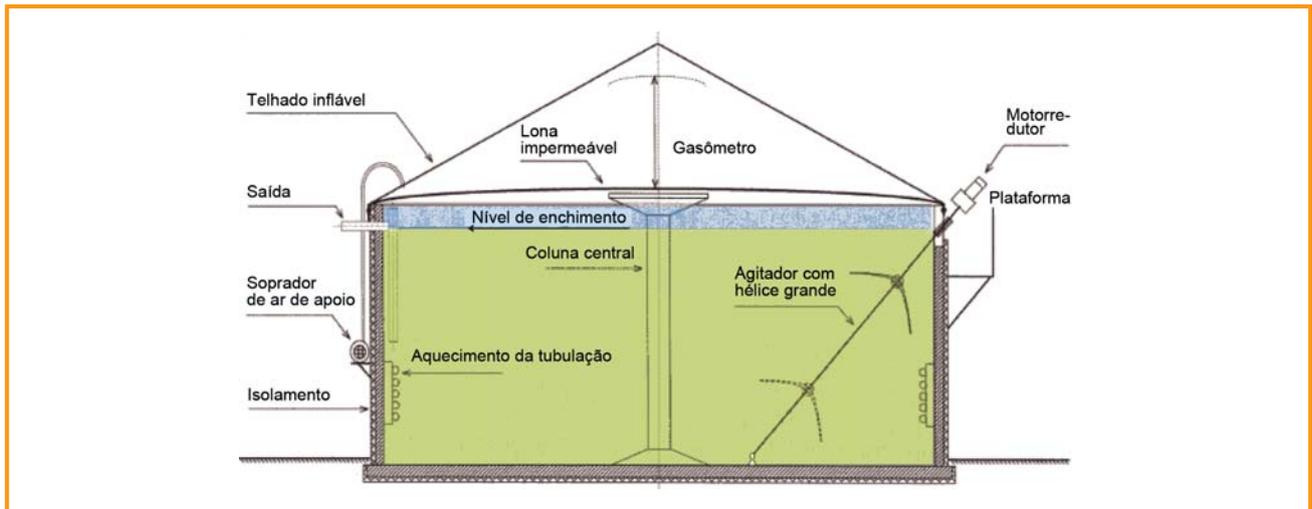


Figura 3.22: Biodigestor de mistura completa com agitador de eixo longo e demais equipamentos [Anlagen- und Apparatebau Lütke GmbH]

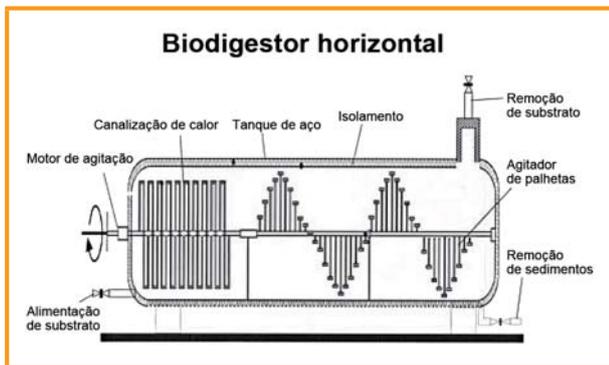


Figura 3.23: Reator de fluxo pistonado (digestão úmida) [3-4]

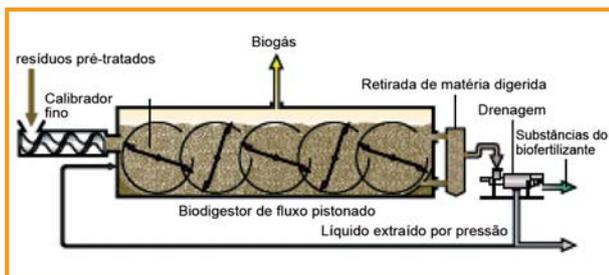


Figura 3.24: Reator de fluxo pistonado (digestão seca) [Strabag-Umweltanlagen]

O princípio do fluxo pistonado reduz o risco de que substrato não completamente fermentado seja extraído do digestor, assegurando o tempo de retenção necessário para todo o material [3-3].

Processamento em batelada

O processamento intermitente ou em batelada se destina a usinas móveis do tipo container e a digestores de baia estacionários. Nos últimos anos, esses proces-

so atingiram a maturidade para uso em escala comercial e se estabeleceram no mercado. Especialmente os biodigestores de baia feitos em concreto armado têm ampla aplicação na fermentação de silagem de milho, de gramíneas e outros substratos que podem ser despejados.

No processamento em batelada, os biodigestores são encheidos com biomassa e fechados hermeticamente. Os microrganismos do inóculo misturado ao substrato fresco aquecem o substrato na primeira fase, na qual é adicionado ar ao digestor. Isso provoca a liberação de calor associada ao processo de compostagem. Depois de atingida a temperatura ideal, o fornecimento de ar é desligado. Após o consumo do oxigênio aplicado, entram em atividade os microrganismos que, como na digestão úmida, começam a converter a biomassa em biogás. O biogás é capturado na tubulação coletora de gás e transferido para o local de geração de energia [3-1].

A prática provou ser adequada uma bateria de biodigestores com 2 a 8 unidades – em geral 4. Assim, é possível atingir uma produção semicontínua de gás.

A bateria de biodigestores se encontra conectada a um reservatório de percolado, o qual coleta o líquido drenado dos digestores e o transforma em biogás. Além disso, o líquido percolado é pulverizado sobre o material em fermentação no digestor, a fim de inoculá-lo. Um exemplo de biodigestor de baia e bateria de biodigestores é mostrado na figura 3.26.

Técnicas especiais

Existem outras técnicas que não se enquadram perfeitamente nas categorias anteriormente descritas e se



Figura 3.25: Biodigestor de fluxo pistonado; exemplos práticos, cilíndrico (esquerda), retangular, com gasômetro montado no topo (direita) [Novatech GmbH (esquerda), DBFZ (direita)]



Figura 3.26: Exemplo de biodigestor de baia; bateria de biodigestores [Weiland, vTI] e portão do biodigestor [Paterson, FNR]

distinguem das técnicas mais comuns de digestão seca e úmida. Uma série de novas abordagens foi criada e, atualmente, não é possível estimar que impacto elas terão no futuro.

Uma das técnicas especiais de digestão úmida, difundida na Alemanha do Leste, realiza a mistura do substrato em um processo de câmara dupla, operando sob o princípio de Pfefferkorn, o inventor do processo. Nesse processo, a recirculação do substrato é obtida pela formação de pressão resultante da produção de gás, seguida da perda de pressão ao ser atingida uma determinada sobrepressão. Essa técnica dispensa o uso de energia elétrica para realizar a recirculação, embora a construção do biodigestor seja mais complexa. A agroindústria conta com mais de 50 usinas de biogás baseadas nessa tecnologia. Seus volumes variam entre 400 e 6.000 m³, e sua aplicação se dá principalmente na fermentação de esterco com reduzidas frações de biomassa dedicada e na digestão de lodo. Na figura 3.27 é apresentada a estrutura de um biodigestor de câmara dupla.



Figura 3.27: Biodigestor de câmara dupla [ENTEC Environment Technology Umwelttechnik GmbH]

No âmbito da digestão seca, o princípio de processamento em batelada evoluiu, originando diferentes formas. Sejam quais forem as variações, a técnica tem

em comum o fato de processar em espaços fechados os substratos que podem ser despejados.

A fermentação em bolsas de plástico foi uma solução simples herdada da tecnologia de silagem. Nela, uma bolsa de plástico impermeável a gases e com até 100 m de comprimento, deitada sobre uma placa aquecível de concreto, é alimentada com substrato por meio de um equipamento de enchimento. O biogás é capturado por uma tubulação de coleta e transportado para uma usina de cogeração.

O reator sequencial em batelada (RSB) denomina os sistemas com carregamento pelo topo. A umidificação do substrato se restringe à percolação regular, até que o material a fermentar se encontre submerso.

O processo de dois estágios com biodigestores de baía com agitadores representa uma evolução da técnica. As roscas integradas aos digestores se encarregam de homogeneizar o material, que é então transportado para o estágio seguinte por meio de transportadores helicoidais. Os biodigestores de batelada são fabricados sem porta. O material despejável é encapsulado completamente, sendo introduzido e retirado por meio de transportadores helicoidais.

Um processo de digestão seca/úmida de dois estágios realiza em uma baía a hidrólise e a percolação do material. O líquido da hidrólise e da percolação é encaminhado para um tanque de hidrólise. Esse tanque alimenta o estágio de metanização. A técnica é capaz de iniciar e cessar a metanogênese em uma questão de poucas horas, sendo, portanto, adequada para a manutenção de reserva operacional. A figura 3.28 ilustra alguns tipos especiais de usinas.

3.2.2.2 Estrutura dos biodigestores

Essencialmente, os biodigestores se compõem do reator de gás propriamente dito (construído com isolamento térmico), de um sistema de aquecimento, equipamentos de agitação e sistemas de retirada de sedimentos e do substrato digerido.

Estrutura dos reservatórios

Os biodigestores são confeccionados em aço, aço inoxidável ou concreto armado.

Um ambiente saturado de água confere ao **concreto armado** suficiente impermeabilidade a gases. Essa umidade é garantida pela água contida no substrato e no biogás. Os biodigestores são moldados em concreto no local ou montados com peças pré-moldadas. Desde que a estrutura do solo o permita, é possível enterrar o reservatório de concreto parcial ou totalmente. O teto do reservatório pode ser de concreto. Em reservatórios en-

terrados, ele pode ser projetado para permitir o trânsito de veículos, caso em que o armazenamento do biogás é realizado em um gasômetro externo. Se o biodigestor tiver também a função de gasômetro, são utilizados tetos de lona impermeáveis a gases. Reservatórios maiores exigem que o teto de concreto seja apoiado por colunas centrais, o que, se não realizado corretamente do ponto de vista técnico, pode acarretar rachaduras no topo. Antigamente, não eram raras as rachaduras, causando vazamentos e corrosão do concreto e, em casos extremos, a demolição do biodigestor.

Para evitar esses problemas, deve-se utilizar concreto de qualidade adequada e o projeto deve ser executado por profissionais. A Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V. (associação alemã de produtores de cimento) editou as instruções LB 14 "Concreto para Reservatórios em Usinas de Biogás" [3-13], que contém recomendações sobre os requisitos de qualidade do concreto destinado à construção de biodigestores de concreto armado. Os dados fundamentais do concreto destinado à construção de usinas de biogás se encontram na tabela 3.20. Maiores informações podem ser obtidas nos folhetos de instruções de agricultura LB 3 [3-10] e LB 13 [3-11]. Um biodigestor de concreto armado em fase de construção se encontra exemplificado na figura 3.29.

Reservatórios de **aço** e **aço inoxidável** são colocados e conectados a um alicerce de concreto. São utilizadas tiras de aço bobinado e chapas de aço soldadas ou parafusadas. É necessário impermeabilizar os pontos parafusados. Digestores de aço são posicionados invariavelmente acima do solo. Geralmente, a construção do teto é usada como gasômetro e recoberta por uma lona impermeável a gases. Os valores característicos e as propriedades dos reservatórios de aço se encontram expostos na tabela 3.21. Exemplos exibidos na figura 3.30.

3.2.2.3 Mistura e equipamentos de agitação

Manter o conteúdo do biodigestor bem agitado é importante por diversas razões:

- inoculação do substrato fresco por contato com o líquido biologicamente ativo do digestor,
- distribuição uniforme de calor e nutrientes no digestor,
- prevenção e eliminação de camadas de sedimentos e sobrenadante,
- extração adequada do biogás do substrato.

A introdução de substrato fresco, a convecção térmica e a ascensão de bolhas de gás são fatores que promovem a mistura do substrato em fermentação, ainda



Figura 3.28: Exemplos de configurações especiais na fermentação a seco; reator sequencial em batelada (esquerda), biodigestor de baia com agitador (centro), estágio de metanização da digestão seca/úmida e gásômetro externo (direita) [Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. Potsdam (esquerda), Mineralit GmbH (centro), GICON GmbH (direita)]



Figura 3.29: Construção de um biodigestor de concreto [Johann Wolf GmbH & Co Systembau KG]

que em grau reduzido. Essa mistura passiva, no entanto, é insuficiente, exigindo o apoio de um processo de mistura ativo.

Esse processo de mistura pode ser mecânico, por equipamentos no biodigestor, tais como agitadores; hidráulico, por bombas posicionadas externamente; ou pneumático, pelo soprimento de biogás no biodigestor.

Os dois últimos métodos têm importância secundária. Na Alemanha, cerca de 85% a 90% das usinas fazem uso de dispositivos mecânicos e equipamentos de agitação [3-1].

Agitação por meios mecânicos

A agitação do substrato por meios mecânicos se realiza por agitadores. Esses equipamentos se classificam em dispositivos de propulsão e de mistura. A sua aplicação está condicionada à viscosidade e ao teor de matéria sólida do meio a ser misturado. Não é raro que se utilize uma combinação de ambos os sistemas,

cujas operação combinada é capaz de intensificar o efeito da agitação.

Os agitadores são operados em modo contínuo ou em intervalos. Comprovou-se na prática que os intervalos de agitação devem ser otimizados empiricamente, com base nas especificidades da usina de biogás, levando em conta fatores como as características do substrato, as dimensões do reservatório, a propensão à formação de sobrenadante, entre outros. Após a colocação da usina em funcionamento, por questões de segurança procede-se à agitação com mais frequência e mais longa que o normal. Os resultados então obtidos servem para otimizar a duração e frequência dos intervalos e o ajuste dos agitadores. Diferentes tipos de agitadores são adotados.

Biodigestores verticais operando sob o princípio do reator agitado comumente são dotados de **agitadores de motor submersível (AMS)**. Esse tipo de agitador se classifica em AMS de alta rotação, com hélices de duas ou três pás, e AMS de baixa rotação, com uma grande hélice dotada de duas pás. Operando com o princípio da propulsão, esses agitadores são tracionados por motores elétricos sem engrenagem ou com engrenagem redutora. Sua carcaça é impermeável, em ambiente sob pressão, e revestida por camada anticorrosiva. Com isso, o agitador pode ser mergulhado no substrato e arrefecido por ele [3-1]. Os valores característicos dos agitadores de hélice acionados por motor submersível se encontram na tabela 3.22. Exemplos se encontram na figura 3.31.

Outra possibilidade são os **agitadores de eixo longo**, que operam sob o princípio da propulsão e cujo motor se encontra na extremidade de um eixo de agitação, montado obliquamente no biodigestor. O motor se localiza fora do digestor, com o eixo passando pelo seu teto ou, no caso de teto de lona, pela área superior da parede, com impermeabilidade a gases. Os eixos também podem ser apoiados sobre o

Tabela 3.20: Valores característicos e parâmetros operacionais de concreto para reservatórios em usinas de biogás; [3-10], [3-11], [3-13]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • C25/30 nas áreas do biodigestor em que há contato com líquidos; C35/45 no gasômetro ou C30/37 (LP) em componentes expostos ao gelo; C25 em tanques percolados e de carga • concretos com resistência mínima inferior são admissíveis caso se tomem medidas adequadas de proteção do concreto • relação água/cimento = 0,5, para tanques de carga e tanques percolados = 0,6 • contenção da largura de fissuras estimada em = 0,15 mm • cobertura de concreto da armadura de no mínimo 4 cm na face interna
Aplicação	• para todos os tipos de biodigestores (horizontais e verticais), bem como tanques
Vantagens	+ alicerce e biodigestor combinados em apenas um componente + parte da usina pode ser montada com peças pré-fabricadas
Desvantagens	- fabricação somente nos períodos em que as condições climáticas não apresentam gelo - tempo de construção mais longo que o de digestores de aço - as aberturas que se fizerem necessárias após a fase de construção são difíceis e trabalhosas
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • se no piso forem instalados elementos de aquecimento, considerar as tensões originadas pelo calor • assegurar a impermeabilidade a gases • durante a confecção da armadura, considerar as tensões em parte originadas pelos gradientes de pressão na obra, a fim de evitar dados • proteger as áreas do concreto que não se encontram em contato contínuo com o substrato (gasômetro) contra a ação de ácidos corrosivos; empregar camadas de epóxi ou outros materiais apropriados • as autoridades frequentemente exigem a instalação de um sistema de detecção de vazamentos • assegurar a resistência a sulfatos (emprego de cimento HS) • a estática do reservatório deve ser planejada detalhadamente, levando em conta as especificidades do local, com vistas a evitar rachaduras e outros danos

Tabela 3.21: Valores característicos e parâmetros operacionais do aço inoxidável para reservatórios em usinas de biogás

Valores característicos	• aço para construção galvanizado/esmaltado St 37 ou aço inoxidável V2A; no gasômetro corrosivo V4A
Aplicação	• para todos os digestores verticais ou horizontais e tanques
Vantagens	+ possibilidade de pré-fabricação e curto prazo de construção + flexibilidade na confecção de aberturas
Desvantagens	- a construção exigida do alicerce só pode ser realizada em períodos sem gelo - equipamentos de agitação normalmente requerem suporte adicional
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • em função da corrosão, as superfícies devem ser confeccionadas em material de alta qualidade ou revestidas com camada protetora, principalmente as superfícies não permanentemente cobertas por substrato (gasômetro) • garantir a impermeabilidade a gases, principalmente das conexões ao alicerce e teto • as autoridades frequentemente exigem a instalação de um sistema de detecção de vazamentos • evitar rigorosamente danos nas camadas dos reservatórios de aço de construção

fundo do digestor e são dotados de uma ou mais pequenas hélices ou mecanismos de agitação com pás grandes. A tabela 3.23 apresenta os valores característicos de agitadores de eixo longo. Exemplos se encontram na figura 3.32.

Outra opção de sistema de agitação mecânica do digestor baseado em propulsão são os **agitadores axiais**. Eles são comumente utilizados em usinas de biogás dinamarquesas e operam em regime contínuo. Normalmente, esses agitadores são montados no eixo localizado no centro do teto do digestor. A velocidade do motor de acionamento montado externamente ao bio-

digestor é reduzida a poucas rotações por minuto, por meio de um redutor. No interior do biodigestor, os agitadores geram uma corrente contínua que desce pelo centro e sobe próximo às paredes. Os valores característicos e parâmetros operacionais dos agitadores axiais se encontram resumidos na tabela 3.24 e um exemplo é apresentado na figura 3.33.

Agitadores de palhetas ou carretéis são agitadores de eixo longo e com movimento lento. O efeito de agitação não é atingido pela propulsão e sim pelo amassamento do substrato, sendo especialmente eficiente com substratos ricos em matéria seca. Esses agitadores



Figura 3.30: Biodigestor de aço inoxidável em fase de construção [Anlagen- und Apparatebau Lütke GmbH]

têm aplicação em digestores com reator agitado vertical e também em digestores horizontais, os denominados biodigestores de fluxo pistonado.

Em virtude da arquitetura dos digestores *horizontais*, nesse tipo o eixo de agitação é construído horizontalmente, sendo a agitação realizada pelas pás posicionadas no eixo. O fluxo pistonado horizontal é garantido pelo abastecimento posterior do digestor com substrato. Os eixos e os braços de agitação dos agitadores frequentemente possuem serpentinas de aquecimento integradas (ver figura 3.23), com a função de aquecer o substrato. O agitador é colocado em funcionamento várias vezes por dia, por um breve período com baixo número de rotações. Os valores característicos se encontram na tabela 3.25.

Em biodigestores *horizontais* de reator agitado, o eixo de agitação horizontal é apoiado com o auxílio de um elemento de aço. A orientação do eixo não pode ser alterada. Com o auxílio de um agitador de impulso correspondente, é possível a agitação no digestor. A figura 3.34 mostra um exemplo do equipamento. Suas propriedades podem ser conferidas na tabela 3.25.

Agitação pneumática

Embora seja oferecida por alguns fabricantes, a agitação pneumática do substrato de fermentação tem um papel secundário em usinas de biogás na agroindústria.

Na agitação pneumática, o biogás é soprado pelo fundo do biodigestor para o seu interior. Isso origina bolhas de gás que, em um movimento vertical de baixo para cima, promovem a mistura do substrato.

Os sistemas têm a vantagem de que as partes mecânicas necessárias para a mistura (bombas e compressores) são localizadas fora do digestor e, portanto, sofrem menos desgaste. Essas técnicas não se prestam à eliminação de sobrenadantes, podendo por essa ra-

zão ser utilizadas somente para substratos de baixa viscosidade com baixa propensão à formação de sobrenadantes. Os valores característicos de sistemas para mistura pneumática se encontram na tabela 3.26.

Agitação hidráulica

Na agitação hidráulica, o substrato é pressionado para o interior do biodigestor por meio de bombas e bicos agitadores giratórios, horizontais ou também verticais. O substrato deve ser sugado e introduzido de forma a proporcionar o máximo grau de mistura no digestor.

Sistemas com agitação hidráulica também oferecem a vantagem de as partes mecânicas necessárias para a mistura serem localizadas fora do digestor e, portanto, sofrerem menos desgaste e permitirem fácil manutenção. A agitação hidráulica se presta à eliminação de sobrenadantes com restrições, podendo, por essa razão, ser utilizadas somente para substratos de baixa viscosidade com baixa propensão à originação de sobrenadantes. Para avaliar a tecnologia de bombeamento, observar também os dados no capítulo 3.2.1.4. A tabela 3.27 mostra uma visão geral dos valores característicos e parâmetros operacionais da agitação hidráulica.

Retirada do material fermentado

Para evitar a saída do gás, os biodigestores de mistura completa normalmente possuem um ladrão que funciona conforme o princípio do sifão. O substrato digerido também pode ser retirado por meio de bombas. Recomenda-se misturar o material antes de retirá-lo de um reservatório de biofertilizantes. Com isso, o usuário final, p. ex. a agricultura, obtém um adubo orgânico com consistência e qualidade uniformes. Em tais aplicações, consagrou-se o uso de agitadores com tomada de força, que, por não exigirem um motor de-

Tabela 3.22: Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de hélice acionados por motor submersível; [3-2], [3-16], [3-17]

Valores característicos	<p><i>Geral:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • a duração de funcionamento varia conforme o substrato e deve ser determinada na fase de partida • grandes biodigestores podem ser equipados com vários agitadores <p><i>Hélice:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • alta velocidade em modo de operação em intervalos (500 a 1.500 RPM) • faixa de potência: até 35 kW <p><i>Hélice grande:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • baixa velocidade em modo de operação em intervalos (50 a 120 RPM) • faixa de potência: até 20 kW
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os substratos na digestão úmida, em biodigestores verticais • não adequado para viscosidades extremamente altas
Vantagens	<p><i>Hélice:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> + gera turbulência, o que proporciona um bom grau de mistura no biodigestor e a eliminação de sobrenadantes e sedimentação + em função da boa mobilidade, mistura precisa em todas as áreas do biodigestor <p><i>Hélice grande:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> + proporciona ótimo grau de agitação no biodigestor + embora produza menos turbulência, oferece maior potência de propulsão por kW_{el} em comparação com o AMS em alta velocidade de operação
Desvantagens	<p><i>Geral:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - grande quantidade de peças móveis no biodigestor em função dos trilhos-guia - a manutenção exige a abertura do biodigestor, embora geralmente não seja necessário esvaziá-lo (quando equipado com guincho) - possibilidade de ocorrer sedimentação e flutuação em função do regime intervalado da mistura <p><i>Hélice:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - possibilidade de formação de cavernas em substratos ricos em matéria seca (agitador opera em falso) <p><i>Hélice grande:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - a orientação do agitador deve ser definida antes de ser ligado
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • a execução da tubulação guia pelo teto do biodigestor tem de ser impermeável a meios gasosos • controle de intervalo, p. ex., por meio de temporizador ou outro mecanismo de controle de processos • as carcaças dos motores exigem total impermeabilidade a líquidos; alguns modelos de carcaça são dotados de detecção automática de vazamentos • manter o motor resfriado mesmo com o digestor operando em elevadas temperaturas • possibilidade de partida suave e ajuste da velocidade de rotação por meio de conversores de frequência
Formas construtivas	<p><i>Hélice:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • motores elétricos submersíveis com engrenagem redutora e hélice • diâmetro da hélice de até aprox. 2 m • material: resistente à corrosão; aço inoxidável ou ferro fundido revestido <p><i>Hélice grande:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • motores elétricos submersíveis com engrenagem redutora e um par de pás • diâmetro das pás: de 1,4 a 2,5 m • material: resistente à corrosão; aço inoxidável ou ferro fundido revestido; pás em plástico ou resina epóxi reforçada com fibra de vidro
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • em parte difícil, pois o motor tem de ser retirado do biodigestor • as aberturas para a manutenção e retirada do motor têm de ser integradas no digestor • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor

dicado, proporcionam maior economia. Em vez de um motor dedicado, é acoplado um motor de trator para permitir a retirada da biomassa fermentada e a realização da tarefa mais prontamente.

Em digestores horizontais, o material fermentado sai por um ladrão ou por um tubo de saída que se situa abaixo do nível do substrato, sendo pressionado pelo fluxo pistonado que se origina pela introdução do substrato no digestor.

3.2.2.4 Outros dispositivos auxiliares

Muitas usinas de biogás são dotadas de dispositivos que, embora não estritamente necessários para o seu funcionamento, podem ser úteis em determinados casos, conforme o tipo de substrato. A seguir, são apresentados métodos para combater a formação de espuma e camada de sedimentos e é descrita a etapa, posterior ao processo de formação do biogás, em que ocorre a separação entre a fase sólida e a líquida.

Tabela 3.23: Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de eixo longo

Valores característicos	<p><i>Hélice:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • operação em velocidade média a rápida (100 – 300 RPM) • faixa de potência disponível: até 30 kW <p><i>Hélice grande:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • operação lenta (10 – 50 RPM) • faixa de potência disponível: 2–30 kW <p><i>Geral:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • a duração e a velocidade do funcionamento dependem do substrato e devem ser determinadas na fase de partida • material: resistente à corrosão, aço revestido, aço inoxidável
Aplicação	• todos os substratos na digestão úmida, somente em biodigestores verticais
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + proporcionam ótimo grau de agitação no biodigestor + praticamente sem partes móveis no biodigestor + fácil manutenção do acionamento fora do biodigestor + permitem suprimir a sedimentação e flutuação quando em operação contínua
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - em virtude da instalação estacionária, há a possibilidade de mistura incompleta - com isso, podem ocorrer áreas com formação de sobrenadante e sedimentos - a mistura intervalada pode ocasionar sedimentação e flutuação - possível ocorrência de problemas de ruído produzidos pelas engrenagens e motor quando estes se encontram fora do digestor - os eixos e mancais no interior do biodigestor estão sujeitos a falhas, que, em determinadas circunstâncias, podem exigir o esvaziamento parcial ou completo do digestor
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • o eixo do agitador deve ser impermeável a gases • controle de intervalo, p. ex., por meio de temporizador ou outro mecanismo de controle de processos • possibilidade de partida suave e ajuste da velocidade de rotação por meio de conversores de frequência
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • motores elétricos externos com ou sem redutor; eixos de agitação internos com uma ou mais hélices ou pares de pás (em alguns modelos, mecanismo de fragmentação – ver capítulo "Fragmentação") • algumas variantes com extremidade do eixo fixada no fundo, flutuante ou giratório • permite conexão à tomada de força
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • em função da montagem do motor fora do digestor, permitem a manutenção de forma simples e sem interrupção do processo • reparo da hélice e eixo difícil, pois têm de ser retirados do biodigestor ou este deve ser esvaziado • o biodigestor deve conter aberturas para manutenção • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor



Figura 3.31: AMS com hélice (esquerda), tubulação guia (centro), grande pá (direita) [Agrartechnik Lothar Becker (esquerda, centro), KSB AG]

Coletor de espuma e combate à formação de espuma

Conforme o substrato ou composto de substratos, na digestão úmida pode haver a formação de espuma no

biodigestor. Como ela pode entupir a tubulação de gás para a sua retirada, a saída de gás deve ser posicionada o mais alto possível no digestor. Coletores de espuma adicionais auxiliam a evitar que ela penetre na tubulação de substrato dos digestores instalados a jusante. A figura 3.36 ilustra essa disposição.

No gasômetro do digestor, também é possível montar um sensor de espuma que aciona um alarme no caso de formação de espuma em quantidade elevada. A pulverização de substâncias para a inibição da espuma, que exige equipamento especial no digestor, é uma forma de evitá-la nos casos de formação abundante. O equipamento pode ser constituído de um dispositivo de pulverização. No entanto, deve-se ter em mente que os gases corrosivos podem atacar os orifícios finos dos tubos do pulverizador. Pode-se prevenir a corrosão ligando regularmente o equipamento também sem a ocorrência de espuma.



Figura 3.32: Agitadores de eixo longo com dois dispositivos de agitação, com e sem apoio no fundo do biodigestor [WELtec BioPower GmbH; desenho: Armatec FTS-Armaturen GmbH & Co. KG]

Tabela 3.24: Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores axiais para usinas de biogás

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • agitadores de operação lenta em funcionamento contínuo • faixa de potência disponível: até 25 kW • velocidade do funcionamento varia conforme o substrato e deve ser determinada na fase de partida • material: resistente à corrosão, geralmente de aço inoxidável • consumo de potência: p. ex., 5,5 kW a 3.000 m³, geralmente acima
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os substratos na digestão úmida, somente em biodigestores verticais de maior porte
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + proporcionam boa agitação no biodigestor + praticamente sem partes móveis no biodigestor + fácil manutenção do acionamento fora do biodigestor + sobrenadantes finos podem ser aspirados para baixo + processos contínuos de sedimentação e flutuação são, em grande parte, evitados
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - instalação estacionária pode resultar em agitação incompleta - com isso, podem ocorrer áreas com formação de sobrenadante e sedimentos, principalmente nas áreas próximas à borda do digestor - o mancal do eixo está sujeito a elevadas cargas, podendo exigir manutenção intensiva
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • o eixo do agitador deve ser impermeável a gases • admitem instalação de mecanismo de controle das rotações com conversores de frequência
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • motores elétricos externos com redutor, eixos de agitação internos com uma ou mais hélices ou pás, agitadores em pé ou pendurados • a montagem da hélice pode se realizar em um tubo guia, para que se produza corrente • admite a disposição fora de centro
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • em função da montagem do motor fora do digestor, permitem a manutenção de forma simples e sem interrupção do processo • reparo das hélices e eixo difícil, pois têm de ser retirados do biodigestor ou este deve ser esvaziado • o biodigestor deve conter aberturas para manutenção • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor

Entre as substâncias inibidoras de espuma, podem ser utilizados os óleos, preferencialmente os óleos vegetais. Em caso de emergência, pode-se lançar mão da pulverização da fase líquida com água.

Retirada do sedimentado do biodigestor

As camadas de sedimentos se originam pela decantação de areia, ou outras substâncias pesadas, na digestão úmida. São utilizados tanques dotados de separa-

dores de substâncias pesadas para separá-las. Determinados substratos, tais como esterco de galinha, porém, aglutinam a areia fortemente à matéria orgânica, de modo que nos tanques somente é possível separar pedras e outras substâncias pesadas grosseiras. Uma grande parte da areia é liberada somente durante o processo de degradação biológica no biodigestor.

Tabela 3.25: Valores característicos e parâmetros operacionais de agitadores de pás e de carretel em biodigestores verticais e horizontais

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • agitadores de giro lento em operação intervalada • consumo de potência: grandemente influenciado pelo substrato e local de uso; na digestão seca, demanda bem mais elevada em função da resistência oferecida pelo substrato • velocidade do funcionamento varia conforme o substrato e deve ser determinada na fase de partida • material: resistente à corrosão, em geral aço inoxidável revestido, podendo também ser em aço inoxidável
Aplicação	• todos os substratos na digestão úmida (principalmente para substratos com alto teor de matéria seca)
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + proporcionam boa agitação no biodigestor + fácil manutenção do acionamento fora do biodigestor, também permite conexão à tomada de força + evita processos de sedimentação e flutuação
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - a manutenção das pás exige o esvaziamento do biodigestor - avarias na fermentação a seco exigem o esvaziamento manual do biodigestor inteiro (conforme o caso, possibilidade de agitação – agitador secundário – e esvaziamento com bomba) - possibilidade de mistura incompleta em função da instalação estacionária; o fluxo no digestor deve ser assegurado por equipamentos secundários (normalmente rosca de pressão em digestores horizontais, agitadores de impulso em digestores verticais)
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • o eixo do agitador deve ser impermeável a gases • admitem instalação de mecanismo de controle das rotações com conversores de frequência
Formas construtivas	• motores elétricos externos com redutores, agitador interno com várias pás; permitem a montagem de trocadores de calor de tubos, como componente adicional misto no eixo ou como unidade, juntamente com as pás (em biodigestores horizontais)
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • em função da montagem do motor fora do digestor, permitem a manutenção de forma simples e sem interrupção do processo • reparo de pás e eixos dificultado, pois o digestor tem de ser esvaziado • o biodigestor deve conter aberturas para manutenção • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor

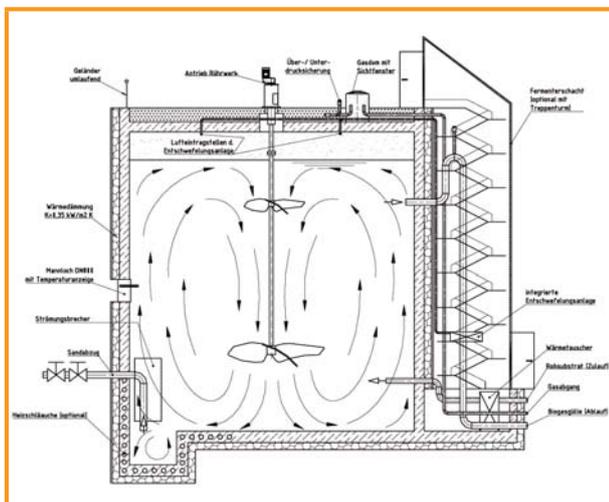


Figura 3.33: Agitador axial [ENTEC Environmental Technology Umwelttechnik GmbH]

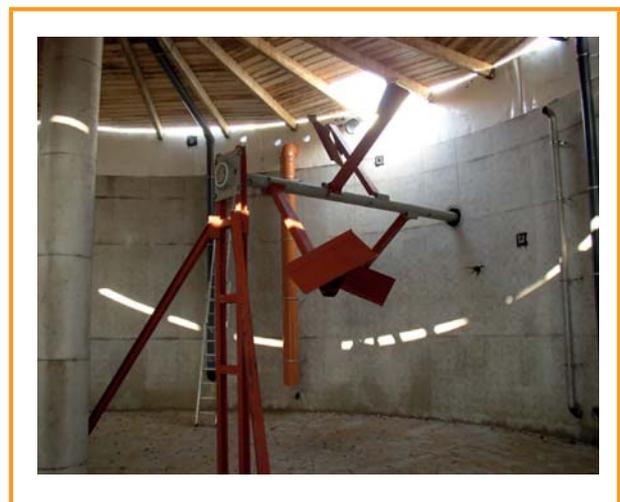


Figura 3.34: Agitador de pás [PlanET GmbH]

Certos substratos, como esterco líquido suíno ou esterco de galinha, promovem a formação dessas camadas. Com o tempo, as camadas de sedimentos podem se tornar substancialmente espessas, reduzindo o volume útil do biodigestor. Já se registraram casos de digestores com até metade do seu volume tomado por

areia. Além disso, as camadas sedimentadas podem se tornar extremamente enrijecidas, exigindo o uso de pás e escavadeiras para a sua remoção. A retirada das camadas de sedimentação do biodigestor se dá por um dreno de fundo ou sistema de raspagem. Se, no entanto, a camada de sedimentos for muito espessa, tais



Tabela 3.26: Valores característicos e parâmetros operacionais da mistura pneumática do digestor.

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • consumo de potência: p. ex., compressor de 15 kW para um digestor de 1.400 m³, operação semicontínua • faixa de potência disponível: a partir de 0,5 kW, todas as faixas são possíveis para usinas de biogás
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos de baixa viscosidade com baixa formação de sobrenadante
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + proporcionam boa agitação no biodigestor + posição dos compressores de gás fora do digestor, o que facilita a manutenção + evita camada de sedimentos
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - a manutenção dos equipamentos de injeção de biogás exige o esvaziamento do digestor
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • o equipamento de compressão deve ser apropriado para a composição do biogás
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • distribuição uniforme de bicos por todo o fundo do biodigestor ou pelo princípio do elevador pneumático de compressão do biogás em um tubo guia vertical • combinação com agitação mecânica ou hidráulica
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • por estar montado na parte externa do digestor, o compressor de gás permite fácil manutenção sem interrupção do processo • o reparo de componentes da injeção de biogás é difícil, pois exige o esvaziamento do digestor • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor

Tabela 3.27: Valores característicos e parâmetros operacionais da agitação hidráulica do biodigestor

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • utilização de bombas de elevada vazão • potência: corresponde às potências usuais de bombas como mencionado no capítulo 3.2.1.4 • material: como em bombas
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os substratos bombeáveis na digestão úmida
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + boa mistura do substrato no biodigestor por meio de bombas centrífugas submersíveis ajustáveis ou tubo guia, possibilitando, também, a eliminação de camadas de sedimentação e sobrenadantes
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - risco de formação de camadas de sedimentação e sobrenadantes com o uso de bombas externas sem direcionamento de fluxo - o uso de bombas externas sem direcionamento de fluxo não permite a remoção de camadas de sedimentação e sobrenadantes
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • consulte o capítulo 3.2.1.4 para saber sobre as particularidades do equipamento
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • bomba centrífuga submersível ou bomba de cavidade progressiva/bomba centrífuga instaladas em local seco, ou bomba de lóbulos, ver capítulo 3.2.1.4 • em bombas externas, os pontos de entrada podem ser equipados com tubos guia ou bicos; permitem comutar entre diferentes pontos de admissão
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • são válidas as mesmas especificações de manutenção que as referidas no capítulo 3.2.1.4

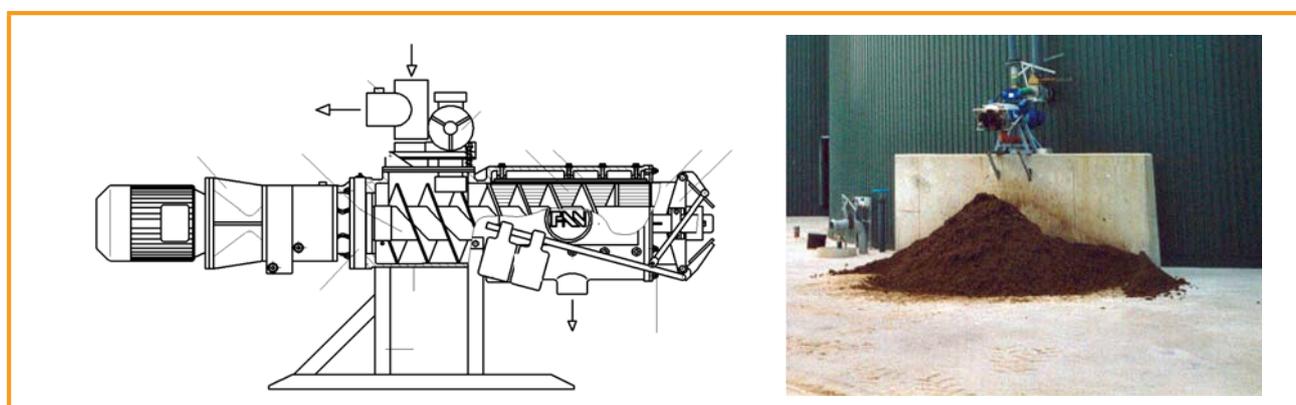


Figura 3.35: Separador de rosca [FAN Separator GmbH (links); PlanET Biogastechnik GmbH]

Tabela 3.28: Especificações dos sistemas de remoção de sedimentos

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> os valores característicos dos equipamentos que compõem os sistemas de remoção de sedimentos equivalem aos dos equipamentos já apresentados separadamente
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> sistema de raspagem somente em biodigestores verticais com base circular e plana roscas de remoção em biodigestores horizontais e verticais fundos cônicos em biodigestores verticais
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> as particularidades dos equipamentos que compõem os sistemas de remoção de sedimentos equivalem às dos equipamentos já apresentados separadamente as roscas de remoção devem ser instaladas através da parede do digestor (com impermeabilidade a líquidos) ou por cima dela (com impermeabilidade a gases) a remoção pode ocasionar fortes odores para o uso de roscas de remoção, no biodigestor deve ser instalado um poço de bombeamento ou algo semelhante
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> sistema de raspagem com acionamento externo, para o transporte da camada de sedimentos para o exterior roscas de remoção no fundo do biodigestor fundo cônico do biodigestor com bomba de descarga e agitador de camada de sedimentos ou aparelho de enxágue
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> a manutenção em sistemas fixos exige o esvaziamento do biodigestor; portanto, é vantajoso o uso de acionamentos externos ou componentes desacopláveis observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor

sistemas de remoção nem sempre serão suficientemente eficazes. Nesse caso, é possível que seja necessário abrir o biodigestor e retirar a camada manualmente ou com o auxílio de máquinas. As especificações dos sistemas de remoção de sedimentos são mostradas na tabela 3.28. Em biodigestores altos, com 10 m ou mais de altura, a pressão estática pode ser suficiente para a remoção de areia, calcário e lodo.

Separação de sólidos e líquidos

Quanto maior a fração de substrato empilhável utilizada na geração de biogás, mais atenção se deve dar à origem do líquido usado na mistura e à capacidade do reservatório de biofertilizantes. O tanque de armazenamento é normalmente destinado ao esterco produzido, não podendo receber substratos adicionais após a fermentação. Nesse caso, o uso de uma separação de líquidos e sólidos pode ser viável economicamente. O líquido extraído por pressão da massa pode ser utilizado como líquido para a mistura ou também como adubo líquido, e a fração sólida pode ser armazenada ocupando pouco volume ou sendo usada para compostagem.

Para separar a fase líquida da sólida, podem ser utilizadas prensas desaguadoras de esteira, centrífugas ou separadores de rosca ou parafuso. Em virtude da predominância dos separadores de rosca, seus valores característicos são mostrados na tabela 3.29. O corte transversal do separador e um exemplo de aplicação se encontram na figura 3.35.



Figura 3.36: Dispositivos para transportar o gás sem distúrbios; tubo de admissão de gás com abertura voltada para cima (alimentação de substrato à esquerda) [DBFZ]

3.2.2.5 Aquecimento e isolamento térmico

Isolamento térmico do biodigestor

Os biodigestores têm, também, de ser equipados com um material de isolamento térmico, a fim de reduzir as perdas de calor. O isolamento térmico é proporcionado por materiais comumente encontrados no mercado. Conforme a área de aplicação (proximidade ao solo, etc.), os materiais devem ter diferentes características (ver tabela 3.30). Alguns exemplos de isolantes e respectivos parâmetros são apresentados na tabela 3.31. O isolante recebe um revestimento de chapas de perfil trapezoidal ou madeira para protegê-lo contra as intempéries.

Tabela 3.29: Especificações dos separadores de rosca

Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • substratos bombeáveis que podem ser deslocados por transportadores helicoidais • para substratos com teor de matéria seca de 10% a aprox. 20% (na fase sólida, o produto pode conter mais que 30% de matéria seca)
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • recursos auxiliares, como osciladores, podem tornar a drenagem mais efetiva • permitem operação totalmente automática
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • equipamento independente • instalação em usinas de biogás com tempo de retenção bem reduzido; permitem economias no dimensionamento dos agitadores e evitam avarias condicionadas pelo uso de sólidos; menor formação de sobrenadantes e camada de sedimentos • montagem a jusante da fermentação para permitir a recirculação de líquidos da mistura, dispensando agitadores no reservatório de biofertilizantes
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • boa acessibilidade do equipamento, a manutenção dispensa a interrupção completa do processo

Tabela 3.30: Valores característicos de isolantes [3-12], [3-13]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • material no biodigestor ou abaixo do solo: materiais de poros fechados, como espuma rígida de poliuretano e vidro-espuma, impedem a entrada de umidade • material acima do nível do solo: lã mineral, mantas de fibras minerais, mantas de espuma rígida, espuma extrudada, styrodur, espumas sintéticas, poliestireno • espessura do material: 5-10 cm são utilizados; abaixo de 6 cm o efeito isolante é reduzido; os valores se baseiam mais na prática que em cálculos; a literatura cita espessuras de isolamento de até 20 cm • transmitância térmica (U) situada na faixa de 0,03 a 0,05 W/(m² · K) • a capacidade de carga do isolante na área do fundo deve ser suficiente para suportar o peso do biodigestor cheio
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • o isolamento térmico pode ser instalado interna ou externamente; não há indícios que mostrem que uma variante seja melhor que a outra
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • os materiais de isolamento têm de ser resistentes a roedores

Aquecimento do biodigestor

Para que o processo de digestão ocorra em condições ótimas, a temperatura no interior do digestor deve ser constante. Não é tão importante que a temperatura seja mantida com a precisão de décimos de graus, mas sim que suas oscilações sejam as menores possíveis. Essa constância se refere tanto a oscilações ao longo do tempo quanto à distribuição da temperatura em diferentes áreas do digestor [3-3]. Se a temperatura sofrer oscilações drásticas ou se situar acima ou abaixo de determinados valores, pode ocorrer a inibição do processo de fermentação ou até mesmo a suspensão do processo. Vários fatores podem causar oscilações de temperatura:

- alimentação do substrato fresco
- formação de camadas ou zonas de temperatura em função do isolamento térmico insuficiente ou mau dimensionamento do sistema de aquecimento; agitação insuficiente
- posição dos elementos de aquecimento
- temperaturas extremas no verão e inverno
- falha nos equipamentos.

Para o fornecimento das temperaturas de processo necessárias e para compensar perdas de calor, o substrato tem de ser aquecido, o que pode ocorrer por meio de trocadores de calor ou elementos de aquecimento externos ou integrados no digestor.

Os **elementos de aquecimento integrados** no digestor elevam a temperatura do substrato em fermentação. A tabela 3.32 contém um resumo das tecnologias utilizadas, e a figura 3.37 contém exemplos.

Trocadores de calor externos aquecem o substrato antes da introdução no digestor, que ali já entra preaquecido. Isso evita a oscilação de temperatura do substrato ao ser introduzido. No uso de trocadores de calor externos, deve-se realizar a recirculação contínua do substrato pelo trocador de calor, ou utilizar um aquecedor extra no digestor, a fim de manter a temperatura em seu interior constante. As propriedades dos trocadores de calor externos podem ser conferidas na tabela 3.33.

Tabela 3.31: Valores característicos de isolantes – Exemplos

Isolante	Condutividade térmica [W/m · K]	Tipo de aplicação
Isolantes de fibra mineral (aprox. 20 - 40 kg/m ³)	0,030-0,040	WV, WL, W, WD
Placas isolantes de perlita (150 - 210 kg/m ³)	0,045-0,055	W, WD, WS
Espuma de poliestireno expandido EPS (densidade aparente > 15 kg/m ³)	0,030-0,040	W
Espuma de poliestireno expandido EPS (densidade aparente > 20 kg/m ³)	0,020-0,040	W, WD
Espuma de poliestireno extrudado XPS (densidade aparente > 25 kg/m ³)	0,030-0,040	WD, W
Espuma rígida de poliuretano PUR (densidade aparente > 30 kg/m ³)	0,020-0,035	WD, W, WS
Vidro-espuma	0,040-0,060	W, WD, WDS, WDH

Tipos de aplicação: WV – com carga de resistência a esforço cortante e de aderência à tração; WL, W – sem carga de resistência à pressão; WD – com carga de pressão; WS – isolantes para aplicações especiais; WDH – elevada resistência a carga sob fundos com distribuição de pressão; WDS – elevada resistência a carga para aplicações especiais

Tabela 3.32: Valores característicos e parâmetros operacionais de sistemas de aquecimento integrados; [3-1], [3-12]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> material: na colocação no biodigestor ou como equipamento de agitação; aço inoxidável, PVC ou PEOC (plásticos devem ser colocados com bem pouco espaçamento, em razão da baixa condução térmica); na colocação em concreto, tubulação convencional para aquecimento de pisos
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> aquecedores de parede: todos os tipos de biodigestores de concreto aquecedor de piso: todos os biodigestores verticais aquecedor interior: todos os tipos de digestores, comumente encontrado nos digestores verticais aquecedores combinados com agitadores: todos os tipos de digestores, comumente nos horizontais
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + aquecedores localizados no biodigestor e combinados com agitadores se caracterizam por boa transferência de calor + aquecedores de piso e parede não ocasionam sedimentação + aquecedores integrados a agitadores são capazes de aquecer uma grande quantidade de material
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - a formação de camadas de sedimentos pode reduzir drasticamente a eficácia de aquecedores de piso - aquecedores no biodigestor podem ocasionar sedimentos e, portanto, devem ser instalados com a uma distância da parede
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • a tubulação de aquecimento deve ser purgada, o que se consegue pela circulação de baixo para cima • canalizações de calor no concreto causam tensões térmicas • conforme o tamanho do biodigestor, instalado em dois ou mais circuitos • o equipamento de aquecimento não pode obstruir outros equipamentos (p. ex. raspadores) • sistemas de aquecimento na parede ou no piso são inadequados para a operação termofílica
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • aquecedores de piso • aquecedores instalados em parede (em digestores de aço, é possível também a instalação na parede exterior) • aquecedores localizados em frente à parede • aquecedor integrado a agitadores ou neles combinado
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • para garantir a boa transferência de calor, os aquecedores devem ser limpos regularmente • elementos de aquecimento integrados no digestor ou na estrutura são de difícil acesso ou inacessíveis • observar as normas de segurança durante trabalhos no biodigestor

3.2.3 Armazenamento do substrato digerido

3.2.3.1 Biofertilizantes líquidos

Em princípio, o armazenamento pode se dar em lagoas e em reservatórios cilíndricos ou retangulares (fundos ou rasos). Normalmente, são usados reservatórios circulares verticais de concreto e aço inoxidá-

vel/aço esmaltado, que em sua estrutura básica equivalem aos digestores verticais de reator agitado (ver capítulo 3.2.2.1 "Tipos de digestores"). Podem ser dotados de um agitador para homogeneizar os biofertilizantes antes da retirada. Há a opção de agitadores fixos (p. ex. agitador com motor submersível) ou agitadores laterais, articulados ou de trator, tracionados por uma tomada de força. Além disso, tanques de



Figura 3.37: Tubos de aquecimento de aço inoxidável instalados em biodigestor (no lado interno) (esquerda); montagem de mangueiras de aquecimento no biodigestor (direita) [Biogas Nord GmbH; PlanET Biogastechnik GmbH (direita)]

Tabela 3.33: Valores característicos e parâmetros operacionais de trocadores de calor externos; [3-3], [3-12]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> material: geralmente de aço inoxidável potência de transferência condicionada pela capacidade da usina e temperatura do processo diâmetros dos tubos correspondem às tubulações usuais de substratos em usinas de biogás
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> todos os tipos de biodigestores, com uso principalmente em biodigestores de fluxo pistonado
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + garantem uma boa transferência de calor + material fresco não causa choque de temperatura no digestor + o aquecedor atinge completamente o volume de material + trocadores de calor externos podem ser limpos e mantidos com facilidade + permitem bom ajuste da temperatura
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - em certos casos, exigem aquecimento do biodigestor adicional - o trocador de calor externo é um equipamento adicional e tem custo extra
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> trocadores de calor devem ser purgados, o que se consegue pela circulação de baixo para cima adequados para controle termofílico de processos
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> trocadores de calor de tubo duplo ou espiral
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> boa acessibilidade para a manutenção e limpeza

armazenamento podem ser equipados com uma cobertura (impermeáveis ou não a gases). Ambas as variantes têm a vantagem de reduzir as emissões de odores e minimizar as perdas de nutrientes durante a armazenagem. Coberturas impermeáveis a gás, como os tetos de lona (ver capítulo 3.2.4.1 "Armazenamento integrado"), oferecem, inclusive, a possibilidade de usar o potencial restante de produção de gás proporcionado pelos biofertilizantes e podem ser também utilizadas como gasômetro. Embora seja discutível a necessidade de uma cobertura impermeável a gases em dependência dos substratos utilizados, tempo de retenção e controle do processo, muitas das novas usinas são licenciadas somente com uma cobertura desse tipo. Conforme a atual redação da EEG de 01.01.2009, as usinas autorizadas de acordo com a Lei Alemã de Proteção contra Emissões somente recebem o bônus de biomassa dedicada se os depósitos de biofertilizantes tiverem cobertura impermeável a gases (ver capítulo 7).

As lagoas são tanques cavados no solo e recobertos com lona, tendo em geral forma retangular. A maioria dessas fossas é aberta em sua parte superior, sendo a minoria coberta com lona para a redução de emissões.

O tamanho do reservatório de biofertilizantes é definido pelo momento ideal da retirada desses resíduos e transporte para as áreas a serem adubadas. Esse aspecto da retirada dos biofertilizantes é referido no Regulamento Alemão de Adubação e no capítulo 10. Geralmente, os depósitos de biofertilizantes são dimensionados com uma capacidade de armazenamento de no mínimo 180 dias.

3.2.3.2 Biofertilizantes sólidos

A biomassa fermentada sólida se origina na fermentação a seco e também como fração do produto da digestão. Conforme a utilização, eles são depositados em locais pavimentados a céu aberto ou em galpões, reservatórios descobertos, em alguns casos móveis, e em containers. Geralmente, o armazenamento se dá

Tabela 3.34: Valores característicos e parâmetros operacionais de cúpulas de lona, dados em parte de [3-3]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • disponível para volumes de gasômetro de até 4.000 m³ • sobrepressão: 5-100 mbar • permeabilidade da lona: estimativa de 1-5‰ de perda de biogás por dia • materiais: borracha butílica, liga de polietileno e polipropileno, borracha de EPDM
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • para todas as usinas de biogás com biodigestor vertical e pós-digestor com o maior diâmetro possível
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + dispensam edifício adicional + não exigem mais espaço
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - como o metano se encontra fortemente misturado a outros gases em um grande espaço, a sua atual concentração no gasômetro do biodigestor não pode ser medida e, portanto, não reflete a atividade dos microrganismos - sem um telhado adicional, o isolamento térmico do gasômetro é insignificante - sem telhado extra, sensibilidade a ventos
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • possibilidade de isolamento térmico por meio de lona dupla inflada (cobertura inflável) • agitadores não podem ser montados sobre o teto do biodigestor
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • lona na forma de telhado sobre o digestor • lona de membrana dupla • lona sob telhado fixo em digestor elevado • balão de PVC fixo e separado • balão de PVC abrigado em edifício separado ou tanque • balão de PVC em teto intermediário acima do biodigestor • bolsa de PVC pendente em edificação (p. ex. em paiol não utilizado) • armazém com lona de membrana dupla
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • praticamente livre de manutenção

em pilhas em pavimentos impermeáveis de concreto ou asfalto e se assemelha ao armazenamento de esterco sólido. Em alguns casos, também são utilizados silos trincheira vazios como local de armazenamento. Os líquidos drenados, líquidos extraídos por pressão ou água de chuva devem ser coletados e reciclados na usina de biogás. A entrada de precipitação pode ser minimizada por coberturas adicionais ou telhados fixos.

Preferencialmente, utilizam-se containers de aço inoxidável para a compressão da fração sólida da biomassa fermentada líquida. Eles são posicionados, p. ex., abaixo do separador (ver figura 3.36) e removidos quando cheios. Nesse caso, também utilizar a cobertura do reservatório para proteger contra a entrada de precipitação. Opcionalmente, a separação de líquidos e sólidos e o armazenamento da fração sólida também podem se dar em um galpão. Quando localizados em um galpão, se necessário, o ar de exaustão pode ser conduzido por um equipamento de exaustão (p. ex., lavador ou filtro biológico).

3.2.4 Armazenamento do biogás

A geração de biogás apresenta oscilações e picos na quantidade produzida. Por essa razão e porque a quantidade utilizada é praticamente constante, o gás tem de ser armazenado em locais adequados. Os gasô-

metros têm de ser impermeáveis a gases, resistentes à pressão, raios UV, temperatura, intempéries e à ação das substâncias em contato. Antes de entrar em funcionamento, inspecionar o gasômetro quanto à sua estanqueidade. Por razões de segurança, os gasômetros devem estar equipados com mecanismos de segurança contra sobrepressão e subpressão, visando evitar que a pressão interna se altere para níveis não admissíveis. Outros requisitos e normas de segurança de gasômetros se encontram também nos "Preceitos de Segurança para Usinas de Biogás" de uso agrícola [3-18]. O dimensionamento do gasômetro deve permitir o armazenamento de pelo menos 25% da produção diária. Normalmente, recomenda-se um volume equivalente à produção de 1 a 2 dias. Os gasômetros podem ser de baixa, média e alta pressão.

O mais comum é a variante de **baixa pressão** com faixa de sobrepressão de 0,5 a 30 mbar. Os gasômetros de baixa pressão são compostos de lonas impermeáveis que devem atender aos requisitos de segurança. Gasômetros de lona de PVC flexível são utilizados como cúpulas sobre o biodigestor (integrado) ou como depósitos de gás instalados externamente. Explicações detalhadas se encontram em 3.2.4.1 e 3.2.4.2.

Gasômetros de média e alta pressão armazenam o biogás a pressões de serviço entre 5 e 250 bar em cilindros e tanques de aço [3-1], são caros e têm alto custo operacional. Os gasômetros com pressão até

Tabela 3.35: Valores característicos e parâmetros operacionais de gasômetros de biogás externos, dados em parte de [3-3]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • gasômetros disponíveis com volume de até 2.000 m³ (também volumes maiores conforme solicitação) • sobrepressão: 0,5-30 mbar • permeabilidade da lona: estimativa de 1 - 5‰ de perda de biogás por dia • materiais: PVC (não muito durável), borracha butílica, liga de polietileno e polipropileno
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • qualquer usina de biogás
Vantagens	+ a concentração de metano no biogás em formação pode ser medida no gasômetro do biodigestor (nele, o volume de gás é pequeno e a mistura de gases baixa) e reflete a atividade dos microrganismos
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - exigem, possivelmente, espaço extra - conforme o caso, podem exigir uma edificação adicional
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • o uso de pesos permite aumentar a pressão para transportar o gás até a usina de cogeração • quando instalados em edifícios, assegurar a boa ventilação do local para evitar misturas de gás explosivas • a potência do motor da usina de cogeração pode ser ajustada conforme o nível de enchimento
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • balão de PVC fixo e separado • balão de PVC abrigado em edifício separado ou tanque • balão de PVC em teto intermediário acima do biodigestor • bolsa plástica pendente em edificação (p. ex., em paiol não utilizado) • armazém com lona de membrana dupla
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • praticamente livre de manutenção

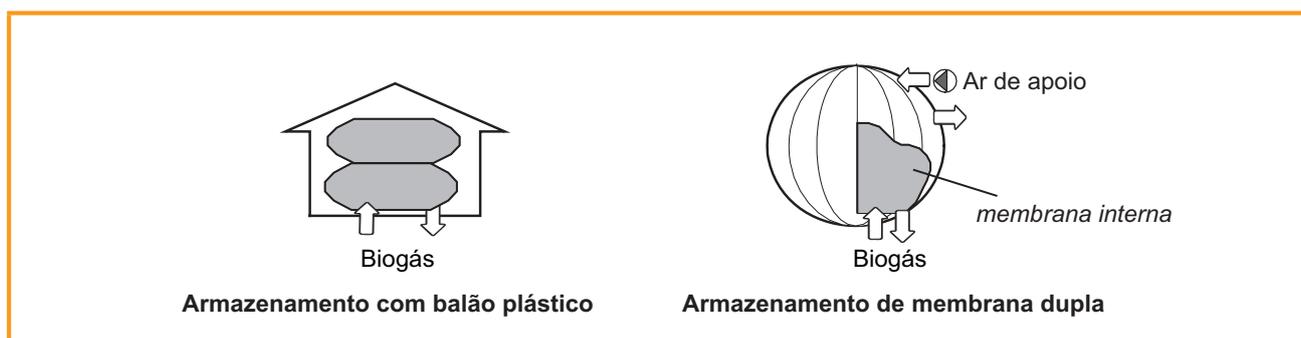


Figura 3.38: Gasômetros de lona [ATB Potsdam]

10 bar consomem até 0,22 kWh/m³, e os de alta pressão, operando entre 200 e 300 bar, exigem cerca de 0,31 kWh/m³ [3-3]. Por essa razão, raramente são utilizados em usinas de biogás agrícolas.

3.2.4.1 Armazenamento integrado

As cúpulas de lona são usadas quando o próprio biodigestor, o reservatório de pós-digestão ou o reservatório de biofertilizantes assumem também a função de gasômetro. A lona é fixada na borda superior do reservatório de forma a garantir a impermeabilidade a gases. No reservatório, é montada uma armação de suporte sobre a qual a lona se apoia quando o gasômetro se encontra vazio. A lona se infla conforme o nível de enchimento do gasômetro. Valores característicos podem ser obtidos na tabela 3.34 e exemplos se encontram na figura 3.38.

De uso amplamente disseminado são os telhados infláveis, sobre os quais é esticada uma segunda lona como proteção contra intempéries. Um soprador se encarrega de introduzir ar entre as duas lonas. Assim, a lona superior sempre se encontra esticada e sob tensão e a película inferior se ajusta ao volume de biogás armazenado. A pressão do gás é mantida praticamente estável nesse sistema.

3.2.4.2 Gasômetros externos

Um dos tipos de gasômetro externo de baixa pressão é o balão plástico, geralmente também de PVC. A fim de proteger contra a ação climática, o balão plástico é abrigado em um edifício adequado ou equipado com uma segunda lona (figura 3.39). A figura 3.40 ilustra um gasômetro externo. As especificações de gasômetros externos se encontram na tabela 3.35.



Figura 3.39: Base de suporte de cobertura inflável (esquerda); usina de biogás com coberturas infláveis [MT-Energie GmbH]

Tabela 3.36: Valores característicos e parâmetros operacionais de flares

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • fluxos de até 3.000 m³/h possíveis • temperatura de combustão de 800 – 1.200 °C • material: aço ou aço inoxidável
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • qualquer usina de biogás
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • possibilitam queima aberta ou enclausurada • permitem atender às diretrizes técnicas alemãs para a manutenção do ar limpo (TA Luft) quando em combinação com câmara de combustão isolada, embora não obrigatória para o uso com <i>flares</i> • disponíveis com corrente de ar natural ou soprador • respeitar as notas de segurança, particularmente em relação à distância até edifícios próximos • exigem o aumento da pressão do biogás antes que atinja o bico do queimador
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • módulo separado sobre pequena base de concreto com operação manual ou automática
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • praticamente livre de manutenção

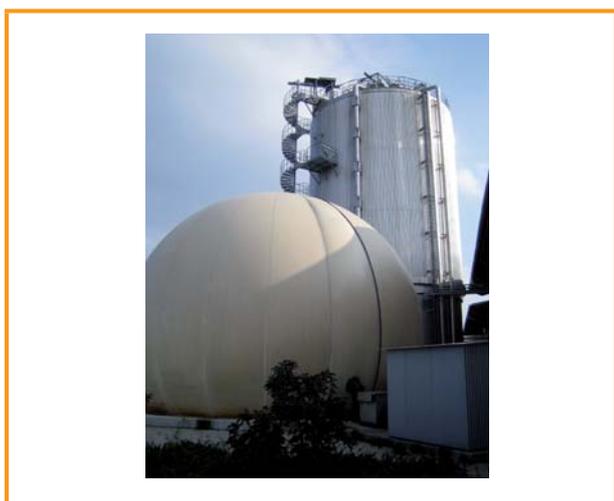


Figura 3.40: Gasômetro de camada dupla [Schüsseler, FNR]

3.2.4.3 Flare

Se o gasômetro atinge a sua capacidade máxima de armazenar biogás e/ou este não pode ser utilizado em função de sua baixa qualidade ou em caso de trabalhos de manutenção, o gás não utilizável deve ser descartado de forma segura. As diretrizes para a autorização da operação são diferentes, conforme o Estado alemão. A partir de fluxos de gás de 20 m³/h, é obrigatória a instalação de uma forma de utilização alternativa à usina de cogeração. Isso pode se dar na forma de uma segunda usina de cogeração (por exemplo, duas usinas pequenas em lugar de uma grande). Em todo caso, a instalação de um *flare* é a forma certa de comprovar a capacidade de eliminação de gases. Geralmente, isso é exigido pelas autoridades. Os valores característicos de flares utilizados no setor de biogás se encontram na tabela 3.36. A figura 3.41 contém a foto de um *flare*.

3.3 Normas e recomendações técnicas relevantes

Além da legislação de equipamentos, segurança no trabalho e proteção do ambiente, uma série de normas e recomendações técnicas aborda os requisitos técnicos de usinas de biogás. Consta, a seguir, uma seleção de publicações de importância:

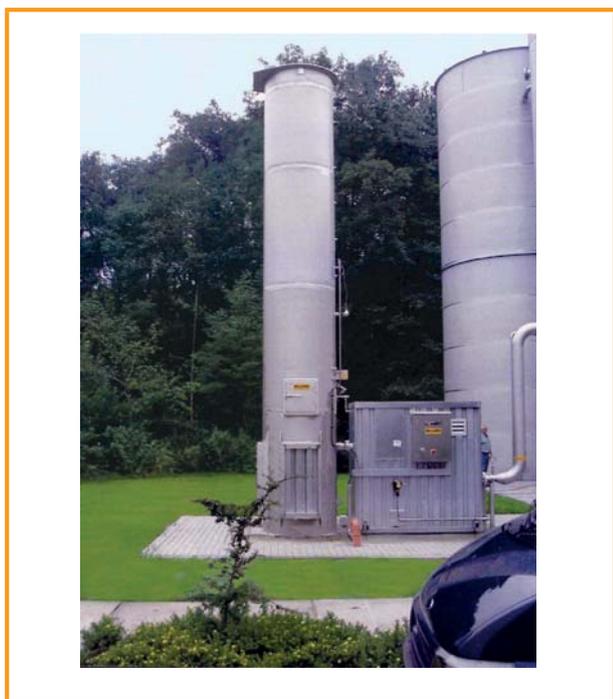


Figura 3.41: Flare de uma usina de biogás [Haase Umwelttechnik AG]

Diretriz VDI 3475 folha 4 (esboço) Redução de emissões – Usinas de biogás na agricultura – Fermentação de plantas energéticas e adubos orgânicos

Diretriz VDI 4631 (esboço) Critérios de qualidade para usinas de biogás

DIN 11622-2 Silos e tanques de esterco líquido

DIN 1045 Estruturas de concreto, concreto armado e concreto protendido

DIN EN 14015 Dimensionamento e fabricação no local de tanques de aço rasos, acima do solo, verticais, cilíndricos, soldados, destinados ao armazenamento de líquidos na temperatura ambiente e temperaturas mais elevadas

DIN 18800 Construções de aço

DIN 4102 Resistência de peças e materiais de construção ao fogo

DIN 0100 parte 705 Instalação de equipamentos de baixa voltagem

VDE 0165 parte 1/ EN 60 079-14 Componentes elétricos para áreas com risco de explosão de gases – parte 14: Equipamentos elétricos em áreas com risco de explosão (exceto construção de fossas)

VDE 0170/0171 Componentes elétricos para áreas com risco de explosão

VDE 0185-305-1 Proteção contra raios

G 600 Normas técnicas para instalações de gás DVGW-TRGI 2008

G 262 Utilização de gases de fontes renováveis na rede pública de abastecimento de gás

G 469 Procedimentos de inspeção de pressão para tubulações e equipamentos do abastecimento de gás

VP 265 ff Equipamentos para o tratamento e injeção de biogás em redes de gás natural

No capítulo 5.4, "Segurança operacional", são fornecidas informações detalhadas sobre outros requisitos técnicos de segurança para a operação de usinas de biogás. Em particular, esse capítulo aborda as regras de segurança relativas aos riscos reais de intoxicação, asfixia, incêndio e explosão.

3.4 Fontes bibliográficas

[3-1] Schulz, H.; Eder, B.: Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel, 2ª edição revista e ampliada, Editora Ökobuch, Staufen bei Freiburg, 1996, 2001, 2006

[3-2] Weiland, P.; Rieger, Ch.: Wissenschaftliches Messprogramm zur Bewertung von Biogasanlagen im Landwirtschaftlichen Bereich; (FNR-FKZ: 00NR179); 3. Zwischenbericht; Institut für Technologie und Systemtechnik/Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL); Braunschweig; 2001

[3-3] Jäkel, K.: Managementunterlage "Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und -verwertung", Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 1998 / 2002

[3-4] Neubarth, J.; Kaltschmitt, M.: Regenerative Energien in Österreich – Systemtechnik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Viena, 2000

[3-5] Hoffmann, M.: Trockenfermentation in der Landwirtschaft – Entwicklung und Stand, Biogas – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1751, Congresso realizado em Leipzig, 11 e 12 de março de 2003

[3-6] Aschmann, V.; Mitterleitner, H.: Trockenvergären: Es geht auch ohne Gülle, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar Fachbuch, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 2002

[3-7] Beratungsempfehlungen Biogas, Verband der Landwirtschaftskammern e. V., VLK-Beratungsempfehlungen 2002

- [3-8] Block, K.: Feststoffe direkt in den Fermenter, Landwirtschaftliches Wochenblatt, pp. 33 – 35, 27/2002
- [3-9] Wilfert, R.; Schattauer, A.: Biogasgewinnung und -nutzung – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse; DBU Projekt 15071; Zwischenbericht; Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL); Braunschweig, Dezember 2002
- [3-10] Zement-Merkblatt Landwirtschaft LB 3: Beton für landwirtschaftliche Bauvorhaben, Bauberatung Zement
- [3-11] Zement-Merkblatt Landwirtschaft LB 13: Dichte Behälter für die Landwirtschaft, Bauberatung Zement
- [3-12] Gers-Grapperhaus, C.: Die richtige Technik für Ihre Biogasanlage, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar Fachbuch, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 2002
- [3-13] Zement-Merkblatt Landwirtschaft LB 14: Beton für Behälter in Biogasanlagen, Bauberatung Zement
- [3-14] Kretzschmar, F.; Markert, H. (2002): Qualitätssicherung bei Stahlbeton-Fermentern; in: Biogasjournal n° 1/2002
- [3-15] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Nova Iorque, 2ª edição revista e ampliada, 2009
- [3-16] Gesprächsnotiz Dr. Balssen (ITT Flygt Water Wastewater Treatment); Setembro de 2009
- [3-17] Postel, J.; Jung, U.; Fischer, E.; Scholwin, F.; Stand der Technik beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen – Bestandsaufnahme 2008, Umweltbundesamt (Hrsg.); disponível online em http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3873
- [3-18] Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften (Hrsg.); Technische Information 4 – Sicherheitsregeln für Biogasanlagen; Kassel; 10/2008; disponível online em http://www.praevention.lsv.de/lbg/fachinfo/info_ges/ti_4/titel.htm
- [3-19] Oechsner H.; Lemmer A.: Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten?; VDI-Gesellschaft Energietechnik: BIOGAS 2009. Energieträger der Zukunft.; VDI-Berichte, volume 2057; VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009





4 Descrição de Substratos Seleccionados

Este capítulo abordará em detalhe os principais tipos de substratos. Além da origem do substrato, serão explicadas também suas principais características, como a matéria seca (MS), matéria orgânica seca (MOS), nutrientes (N, P, K) e componentes nocivos existentes. Também serão indicadas as produções de gás esperadas e a qualidade do gás, bem como o manuseio dos substratos.

Este capítulo não se propõe a esgotar o assunto, dada a impossibilidade de abranger todo o espectro de substratos potencialmente disponíveis. Os substratos aqui tratados estão sujeitos a variações qualitativas ano a ano. Portanto, as propriedades físico-químicas e as produções de gás aqui mencionadas não são valores absolutos, representando, em primeiro lugar, uma amplitude e uma média dos respectivos parâmetros.

Os valores de produção de biogás e metano são indicados em normal metro cúbico (Nm^3). Como o volume de gás depende da sua temperatura e pressão atmosférica (lei dos gases ideais), a normalização do volume permite comparar diferentes condições operacionais. O volume de gás normalizado se refere a uma temperatura de 0°C e a uma pressão atmosférica de 1.013 mbar. Isso permite também definir um poder calorífico inferior exato à fração de metano do biogás, a qual corresponde a $9,97 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$. Por meio do poder calorífico inferior, é possível inferir sobre a produção de energia, o que pode ser necessário em diversos cálculos comparativos relativos à operação da usina.

4.1 Substratos da agricultura

4.1.1 Adubos orgânicos

A julgar pelas estatísticas sobre a criação de animais de interesse comercial na Alemanha, existe um enorme potencial de aproveitamento energético em usinas de biogás, principalmente na criação de gado e suínos. De-

vido especialmente ao crescimento das empresas pecuárias e à crescente exigência ambiental de que se aproveitem os dejetos animais, formas alternativas de utilização e tratamento do esterco líquido e do esterco sólido produzidos têm de ser desenvolvidas. O aproveitamento energético dos adubos orgânicos é necessário também do ponto de vista da proteção climática, uma vez que permite reduções significativas de emissões. As propriedades de destaque dos adubos orgânicos são apresentadas na tabela 4.1.

A quantidade de biogás produzida com esterco líquido bovino é de $20 - 30 \text{ Nm}^3$ por t de substrato, ligeiramente abaixo do esterco líquido suíno (ver tabela 4.2). Além disso, o biogás oriundo do esterco líquido bovino tem teor de metano nitidamente inferior à do esterco líquido suíno, apresentando, por conseguinte, menor rendimento de metano. Isso se deve às diferenças na composição desses adubos orgânicos. No esterco líquido bovino predominam os carboidratos, no esterco líquido suíno as proteínas, as quais são capazes de originar maiores teores de metano [4-3]. A produção de biogás está condicionada sobretudo pela quantidade de matéria orgânica seca. Na prática, é muito comum a diluição dos adubos orgânicos líquidos, p. ex., pela limpeza do estábulo ou da sala de ordenha, que pode alterar sensivelmente as propriedades das substâncias e influenciar a produção de biogás, originando valores diferentes dos apresentados na tabela 4.2.

O esterco líquido de origem bovina e suína se presta muito bem para o uso em usinas de biogás em função da sua bombeabilidade e fácil armazenamento em tanques. Por causa do seu baixo teor de matéria seca, podem ser facilmente combinados com outros substratos (cossustratos). O carregamento de esterco sólido, por outro lado, exige elevada complexidade técnica. A consistência rígida desse esterco impede que ele seja processado com qualquer equipamento de carregamento de sólidos oferecido no mercado.

Tabela 4.1: Teores de nutrientes de adubos orgânicos (conforme [4-1], ajustados)

Substrato		MS	MOS	N	NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O
		[%]	[% MS]	[% MS]			
Esterco líquido bovino	Δ	6-11	75-82	2,6-6,7	1-4	0,5-3,3	5,5-10
	∅	10	80	3,5	N.E.	1,7	6,3
Esterco líquido suíno	Δ	4-7	75-86	6-18	3-17	2-10	3-7,5
	∅	6	80	3,6	N.E.	2,5	2,4
Esterco bovino	Δ	20-25	68-76	1,1-3,4	0,22-2	1-1,5	2-5
	∅	25	80	4,0	N.E.	3,2	8,8
Esterco de aves	∅	40	75	18,4	N.E.	14,3	13,5

Δ: Faixa dos valores medidos; ∅: Média

Tabela 4.2: Produção e rendimento de metano a partir de adubos orgânicos (conforme [4-2], ajustados)

Substrato		Produção de biogás	Produção de metano	Rendimento de metano
		[Nm ³ /t substrato]	[Nm ³ /t substrato]	[Nm ³ /t MOS]
Esterco líquido bovino	Δ	20-30	11-19	110-275
	∅	25	14	210
Esterco líquido suíno	Δ	20-35	12-21	180-360
	∅	28	17	250
Esterco bovino	Δ	60-120	33-36	130-330
	∅	80	44	250
Esterco de aves	Δ	130-270	70-140	200-360
	∅	140	90	280

Δ: Faixa dos valores medidos; ∅: Média

4.1.2 Biomassas dedicadas

A importância das biomassas dedicadas no contexto da geração de energia elétrica a partir do biogás cresceu significativamente desde a primeira alteração da Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG), em 2004. Desde então, a maioria das usinas inauguradas utiliza biomassas dedicadas. Este capítulo descreve com mais profundidade algumas biomassas dedicadas selecionadas de uso disseminado, e inclui dados sobre a sua composição e respectivas produções de biogás.

Ao decidir que espécies serão cultivadas, não se deve levar em conta apenas a maior produtividade de uma determinada cultura, mas sim analisar a situação

de forma holística abrangendo toda a rotação de culturas. A inclusão de aspectos diversos, tais como os custos do trabalho e os critérios de sustentabilidade de métodos de cultivo alternativos, permite otimizar a cultura de biomassas dedicadas de forma integrada.

4.1.2.1 Milho

O milho é o substrato mais utilizado em usinas de biogás agrícolas [4-4]. Seu sucesso na produção de biogás se deve à sua elevada produtividade por hectare e boa aptidão para a fermentação. A produção é condicionada pelo local de cultivo e pelas condições ambientais, podendo variar entre 35 t/ha de matéria fresca (MF) em regiões arenosas e mais de 65 t MF/ha em regiões de elevada produtividade. Em média, a produtividade é de cerca de 45 t MF/ha. A cultura do milho não exige cuidado intensivo e se adapta na maioria dos lugares.

Na colheita, o pé inteiro de milho é picado e armazenado em silos trincheira. O teor de matéria seca não pode ser inferior a 28% nem exceder 36%. No uso de milho com teor de matéria seca acima de 28% pode ocorrer percolação, o que significa perdas significativas de energia. Silagens com teor de matéria seca superior a 36% têm um elevado teor de lignina e, portanto, menor degradabilidade. Além disso, matéria seca em demasia impede que a silagem seja compactada adequadamente, reduzindo a qualidade da ensilagem e influenciando negativamente sobre a sua estabilidade no armazenamento. Após o depósito no silo, os componentes da planta picados são compactados (p.ex. por meio de carregadeira, trator agrícola) e fechados com uma lona. Após um período de ensilagem de doze semanas, a silagem está pronta para ser

utilizada na usina de biogás. Ao fim deste capítulo se encontram os rendimentos médios de biogás e as propriedades físico-químicas.

Além do uso da planta inteira na forma de silagem de milho, na prática o uso apenas da espiga tem a sua importância. Variantes comuns, produzidas por outros métodos e momentos de colheita, são o milho desintegrado com palha e sabugo (MDPS), o mix de milho e espiga (CCM) e o milho grão. MDPS e CCM normalmente são ensilados após a colheita. O milho grão pode ser ensilado ainda úmido, triturado e ensilado ou seco e ensilado. A densidade energética dos substratos mencionados é bem superior à da silagem de milho, embora as produções por unidade de área sejam inferiores, uma vez que os restos da planta são deixados no campo.

4.1.2.2 Silagem de planta inteira de cereal (SPI)

A maioria dos cereais é apropriada para a produção de silagem de planta inteira, bem como a combinação de diferentes cereais, desde que eles amadureçam ao mesmo tempo. Em função das condições físicas da região de plantio, deve-se favorecer o cultivo do tipo de cereal que forneça a maior produção de massa seca. Na maioria dos locais, isso é propiciado por centeio e triticale [4-5]. De forma análoga à colheita do milho, na SPI de cereal o colmo inteiro é picado e ensilado. Conforme o sistema de uso, o cereal deve ser colhido no ponto em que se verifica a máxima produção de matéria seca (sistema de monocultura). Para a maioria dos cereais, isso se dá ao fim do estágio leitoso/início da fase de massa [4-7]. Dependendo da região e safra, a produção de matéria seca de SPI de cereal atinge 7,5 a quase 15 t/ha. Com teor de matéria seca de 35%, isso corresponde a uma produção de 22 a 43 t de matéria orgânica fresca por ha [4-6].

A produção de silagem de centeio verde é uma prática muito difundida. Nela, o centeio é ensilado bem mais cedo que a SPI, usando a técnica da colheita em dois estádios, ou seja, primeiro ele é moído e em seguida submetido ao murchamento por 1 a 2 dias, picado e ensilado. Imediatamente após a sua colheita, o centeio verde é geralmente sucedido por uma rotação de cultura para a geração de energia (sistema de duas culturas). Esse esquema não é adequado para todas as regiões, pois implica elevado consumo de água. Além do mais, os baixos teores de matéria seca podem dificultar a ensilagem (p. ex. percolação de líquido e acessibilidade ao silo). As propriedades e os valores de produção da SPI de cereal se encontram no fim deste capítulo.

4.1.2.3 Silagem de gramíneas

A exemplo do milho, o cultivo e a colheita de gramíneas bem como o uso de sua silagem podem ser mecanizados. A colheita de silagem de gramíneas é realizada em dois estádios e a coleta da planta murcha se dá por um vagão colhedor de corte fino ou por uma colhedora de forragem. A colhedora de forragem oferece melhores resultados na picagem e por isso é a melhor opção para a silagem de gramíneas em aplicações de biogás.

A silagem de gramíneas pode ser obtida por culturas anuais ou plurianuais, ou de campos. Conforme a região, condições ambientais e intensidade do uso do campo, a produção pode oscilar grandemente. Dependendo das condições climáticas, o uso intensivo pode render três a cinco colheitas por ano. Nesse contexto, deve-se considerar não só os altos custos de mecanização, mas também a possibilidade de elevadas cargas de nitrogênio, que podem acarretar problemas na fermentação. Contudo, a silagem de gramíneas também pode ser colhida de áreas de conservação com exploração extensiva, embora nesse caso o elevado teor de lignina permita apenas rendimentos reduzidos na geração de gás. Existem inúmeros métodos de produção de silagem de gramíneas, o que explica as amplitudes de variação dos valores de rendimento e propriedades da matéria encontradas na literatura, bem maiores que as indicadas na tabela 4.3 e tabela 4.4.

Vale ressaltar que, na produção de silagem de gramíneas destinada a usinas de biogás, a digestibilidade ou degradabilidade da matéria deve ser prioridade. Portanto, se possível, é necessário assegurar que os conteúdos de matéria seca não ultrapassem 35%. Ocorrências maiores desses conteúdos significam mais frações de lignina e fibras, o que diminui a taxa de degradação e o rendimento do metano em relação à matéria orgânica seca. Embora essa silagem possa ser carregada no processo, seu elevado teor de matéria seca e sua constituição em parte com fibras longas podem ocasionar problemas técnicos (p. ex. rápida formação de sobrenadante e enrolamento nas pás dos agitadores).

4.1.2.4 Grãos de cereais

Grãos de cereais servem muito bem como complemento ao substrato em usinas de biogás. Seu elevado rendimento e sua rápida degradabilidade permitem que sejam utilizados para o ajuste fino da geração de biogás, qualquer que seja o tipo do cereal. Para garantir a rápida decomposição, é importante que os grãos do cereal sejam fragmentados antes da dosagem (p. ex. por esmagamento ou trituração).

4.1.2.5 Beterraba

A elevada taxa de crescimento da beterraba (sacarina e forrageira) explica a sua aptidão como cultivo de biomassa dedicada. Especialmente a beterraba sacarina tem tradicionalmente um papel muito importante na agricultura de algumas regiões. Em virtude de medidas de regulamentação do mercado, cada vez mais as quantidades de beterraba para a produção de açúcar têm sido reduzidas. O foco vem se voltando para a utilização da beterraba sacarina como fonte de biogás, uma vez que a sua técnica de cultivo é dominada e a espécie oferece inúmeras vantagens do ponto de vista agrônômico.

A beterraba tem exigências muito específicas quanto ao solo e ao clima. Para atingir produtividades elevadas, ela prefere climas mais amenos e solos profundos e ricos em húmus. Nos plantios em solos leves, a irrigação é uma forma de aumentar a produtividade significativamente. A produtividade varia conforme as condições locais e climáticas. A beterraba sacarina produz em média 50 - 60 t MF/ha. Além desses fatores, o tipo também tem influência na produtividade da beterraba forrageira. Em média a forrageira de baixo teor de MS produz cerca de 90 t MF/ha e a de alto teor cerca de 60 - 70 t MF/ha [4-8]. As produtividades de massa foliar também apresentam diferenças específicas. Para a beterraba sacarina, a relação entre massa da raiz e massa foliar é de 1:0,8. Na beterraba forrageira de elevado teor de MS, essa relação cai para 1:0,5. Em função da sua alta taxa de crescimento, a forrageira de baixo teor de MS apresenta uma relação de "apenas" 1:0,3 - 0,4 [4-8]. As propriedades e produções de gás das beterrabas sacarina e forrageira se encontram nas tabelas 4.3 e 4.4.

O uso de beterraba sacarina na geração de biogás impõe duas dificuldades fundamentais. A primeira é que a terra aderida à raiz da beterraba tem que ser limpa, pois caso contrário ela se deposita no fundo do digestor e reduz o seu espaço útil. Para sanar essa dificuldade, estão sendo desenvolvidos processos de limpeza com água. O segundo desafio é o armazenamento, que se provou difícil em virtude do baixo teor de matéria seca da beterraba. Na prática, tenta-se contornar essa dificuldade por meio da ensilagem combinada com milho, ou da implementação de ensilagem em mangueiras de plástico ou lagoas. A safra de inverno da beterraba e os métodos para o seu aproveitamento ainda se encontram em fase de testes.

Tabela 4.3: Propriedades de biomassas dedicadas selecionadas conforme [4-1], ajustadas

Substrato		MS [%]	MOS [% MS]	N	P ₂ O ₅ [% MS]	K ₂ O
Silagem de milho	Δ	28-35	85-98	2,3-3,3	1,5-1,9	4,2-7,8
	Ø	33	95	2,8	1,8	4,3
SPI de cereal	Δ	30-35	92-98	4,0	3,25	N.E.
	Ø	33	95	4,4	2,8	6,9
Silagem de gramíneas	Δ	25-50	70-95	3,5-6,9	1,8-3,7	6,9-19,8
	Ø	35	90	4,0	2,2	8,9
Grãos de cereais	Ø	87	97	12,5	7,2	5,7
Beterraba sacarina	Ø	23	90	1,8	0,8	2,2
Beterraba forrageira	Ø	16	90	N.E.	N.E.	N.E.

Δ: Faixa dos valores medidos; Ø: Média

Tabela 4.4: Produções de gás de biomassas dedicadas selecionadas conforme [4-2], [4-6], [4-9], [4-10], ajustadas

Substrato		Produção de biogás [Nm ³ /t substrato]	Produção de metano [Nm ³ /t substrato]	Rendimento de metano [Nm ³ /t MOS]
Silagem de milho	Δ	170-230	89-120	234-364
	Ø	200	106	340
SPI de cereal	Δ	170-220	90-120	290-350
	Ø	190	105	329
Grãos de cereais	Ø	620	320	380
	Δ	170-200	93-109	300-338
Silagem de gramíneas	Ø	180	98	310
	Δ	120-140	65-76	340-372
Beterraba sacarina	Ø	130	72	350
	Δ	75-100	40-54	332-364
Beterraba forrageira	Ø	90	50	350

Δ: Faixa dos valores medidos; Ø: Média



4.2 Substratos da agroindústria de transformação

Este capítulo discorre sobre alguns substratos selecionados da agroindústria de transformação. Trata-se unicamente de substâncias e produtos conjuntos com origem no beneficiamento de plantas e partes de plantas. As substâncias descritas constituem um extrato exemplar da lista positiva dos subprodutos de origem puramente vegetal conforme a EEG de 2009. Suas propriedades físico-químicas e a escolha adequada do local de cultivo possibilitam que elas sejam especialmente aptas para a produção de biogás. É bom observar, porém, que essas substâncias possuem características de resíduos ou se encontram listadas no Anexo 1 do Regulamento Alemão de Resíduos Orgânicos (BioAbfV) (ver capítulo 7.3.3.1). Por conseguinte, a usina de biogás deve receber a respectiva licença e satisfazer os requisitos da BioAbfV no que tange ao pré-tratamento e aproveitamento dos biofertilizantes. Como se pode notar nas tabelas, na prática ocorre grande variação das características dos substratos, podendo extrapolar os limites aqui mencionados. Isso se deve principalmente aos processos de produção dos produtos primários – tais como diferentes técnicas, ajustes do equipamento, qualidade de produto exigida, pré-tratamento, entre outros fatores – e à variação na qualidade das matérias-primas. Também as concentrações de metais pesados podem variar em grande medida [4-11].

4.2.1 Fabricação de cerveja

Diversos subprodutos são originados na produção da cerveja, sendo o mais importante o bagaço do malte, que responde por 75% do total. Por hectolitro de cerveja são produzidos aprox. 19,2 kg de bagaço de cevada, 2,4 kg de levedura e sedimentação, 1,8 kg de trub quente, 0,6 kg de trub frio, 0,5 kg de terra diatomácea e 0,1 kg de pó de malte [4-12].

Este capítulo contém pormenores sobre o bagaço do malte, subproduto que representa a maior fração. Vale lembrar que, com exceção da terra diatomácea, as demais frações também se prestam bem ao uso em usinas de biogás. No entanto, atualmente apenas uma parte das quantidades produzidas pode ser efetivamente utilizada, pois os subprodutos têm também outros destinos, tais como a indústria alimentícia (levedura) ou o uso como ração (cevada úmida, pó de malte). As propriedades e os valores de produção se encontram resumidos no capítulo 4.4.

Tabela 4.5: Produção de biogás padrão de subprodutos de origem vegetal, conforme a lista positiva da EEG 2009

Subproduto de origem vegetal	Produção padrão conforme it. V do Anexo 2 da EEG	
	[kWh _e /t MF]	[Nm ³ CH ₄ /t MF]
Bagaço do malte (fresco ou prensado)	231	62
Resíduos de hortaliças	100	27
Hortaliças (refugo)	150	41
Cereal (resíduos)	960	259
Grãos destilados de cereais (trigo) da produção de álcool	68	18
Pó de cereais	652	176
Glicerol do processamento de óleos vegetais	1.346	364
Ervas e plantas medicinais	220	59
Batatas (refugo)	350	95
Batata (em pasta, teor médio de amido)	251	68
Água residual da produção de amido de batata	43	12
Águas residuais da produção de amido de batata	11	3
Polpa de batata da produção de amido	229	62
Cascas de batata	251	68
Resíduo do destilado de batata da produção de álcool	63	17
Melaço da produção de açúcar da beterraba	629	170
Bagaço de frutas (fresco, não tratado)	187	51
Farelo de canola	1.038	281
Torta de canola (teor residual de óleo aprox. 15%)	1.160	314
Flores de corte (refugo)	210	57
Torta prensada de beterraba sacarina da produção de açúcar	242	65
Torta de filtro de beterraba sacarina	242	65

O armazenamento e o manuseio são relativamente descomplicados, embora a estocagem em local aberto signifique grandes perdas de energia e a suscetibilidade a fungos, o que justifica a ensilagem do produto.

Tabela 4.6: Propriedades de subprodutos vegetais selecionados conforme [4-1], [4-2], [4-12], [4-17]

Substrato		MS [%]	MOS [% MS]	N	P ₂ O ₅ [% MS]	K ₂ O
Bagaço do malte	Δ	20-25	70-80	4-5	1,5	N.E.
	∅	22,5	75	4,5	1,5	N.E.
Grãos destilados de cereais	Δ	6-8	83-88	6-10	3,6-6	N.E.
	∅	6	94	8	4,8	N.E.
Resíduo do destilado de batata	Δ	6-7	85-95	5-13	0,9	N.E.
	∅	6	85	9	0,73	N.E.
Resíduo do destilado de frutas	Δ	2-3	aprox. 95	N.E.	0,73	N.E.
	∅	2,5	95	N.E.	0,73	N.E.
Glicerol bruto	[4-1]	100	90	N.E.	N.E.	N.E.
	[4-15]	47	70	N.E.	N.E.	N.E.
Torta de canola		92	87	N.E.	N.E.	N.E.
Polpa de batata	∅	aprox. 13	90	0,5-1	0,1-0,2	1,8
Água residual da batata	Δ	3,7	70-75	4-5	2,5-3	5,5
	∅	3,7	72,5	4,5	2,8	5,5
Torta de filtro de beterraba sacarina	Δ	22-26	95	N.E.	N.E.	N.E.
	∅	24	95	N.E.	N.E.	N.E.
Melaço	Δ	80-90	85-90	1,5	0,3	N.E.
	∅	85	87,5	1,5	0,3	N.E.
Bagaço de maçã	Δ	25-45	85-90	1,1	1,4	N.E.
	∅	35	87,5	1,1	1,4	N.E.
Bagaço de uva	Δ	40-50	80-90	1,5-3	3,7-7,8	N.E.
	∅	45	85	2,3	5,8	N.E.

Δ: Faixa dos valores medidos; ∅: Média

4.2.2 Produção de álcool

Grãos destilados são um subproduto da fabricação de álcool a partir de cereais, beterraba, batata ou frutas. Na fabricação, a cada litro de álcool é produzida uma

quantidade 12 vezes maior de grãos destilados, que, após secos, são usados principalmente como ração animal ou adubo [4-12]. Na maior parte dos casos, porém, o uso de grãos destilados é restrito em função dos baixos teores de matéria seca e, consequentemente, dos custos relativamente elevados de transporte. Nesse contexto, vejamos as oportunidades que se apresentam para a geração de biogás associada à fabricação de álcool. A fermentação dos grãos destilados promove a formação de biogás, o qual pode ser aproveitado em uma usina de cogeração de energia elétrica e calor, que por sua vez suprem as necessidades da fabricação de álcool. Isso possibilita uma utilização em cascata das biomassas dedicadas, configurando uma alternativa sustentável e de uso eficiente dos recursos em relação a processos de reaproveitamento dos grãos destilados adotados até então.

As propriedades físico-químicas das matérias e as produções de gás se encontram respectivamente nas tabelas 4.6 e 4.7, no capítulo 4.4.

4.2.3 Produção de biodiesel

A produção de biodiesel tem como subprodutos a torta prensada de canola e o glicerol bruto, matérias com vocação para o uso como cossubstratos em usinas de biogás agrícolas, graças ao seu elevado rendimento de biogás (tabela 4.6). O rendimento de biogás da torta prensada de canola é regido pelo seu teor residual de óleo, que por sua vez é influenciado pela regulagem das prensas de óleo e pelos teores de óleo da matéria-prima. Isso explica por que na prática se observam diferenças entre os rendimentos de biogás das diferentes tortas prensadas de canola. A produção de uma tonelada de biodiesel gera 2,2 t de torta prensada de canola e 200 kg de glicerol [4-13]. A aplicação desses subprodutos da produção de biodiesel, porém, não é das mais simples e deve ser investigada antecipadamente. Isso se deve ao fato de que a digestão de torta prensada de canola origina grandes quantidades de sulfeto de hidrogênio (H₂S) no biogás [4-14] em função dos seus elevados teores de proteína e enxofre. A dificuldade do uso do glicerol bruto reside no fato de ele conter até 20% de metanol em peso, que em altas concentrações pode ter uma ação inibidora sobre as bactérias metanogênicas [4-15]. Assim, o uso do glicerol no processo deve se limitar a baixas dosagens.

Estudos sobre a codigestão de glicerol bruto com biomassas dedicadas e adubos orgânicos concluíram que a adição de glicerol, perfazendo no máximo 6% em peso, é capaz de produzir um efeito cofermentativo substancial [4-15]. Em outras palavras, a mistura

permitiu uma produção de metano bem maior que a digestão dos substratos separadamente. Os estudos também concluíram que adições de glicerol superiores a 8% não surtiram efeito positivo na codigestão, em alguns casos chegando até a inibir a formação de metano. Em suma, conclui-se que os subprodutos provenientes da produção de biodiesel têm boa aptidão como cossubstrato, desde que utilizados em pequenas quantidades.

4.2.4 Processamento de batatas (fabricação de amido)

Além de efluentes contendo matéria orgânica, a fabricação de amido a partir da batata origina a chamada polpa de batata. Esse subproduto é composto essencialmente de cascas, paredes celulares e células de amido não decompostas que sobram após a obtenção do amido. Cada tonelada de batata processada origina cerca de 240kg de polpa, 760 litros de efluentes do processamento e 400 - 600 litros de águas residuárias [4-16].

Na atualidade, uma parte da polpa é destinada à agricultura para ser utilizada como ração animal e a maior parte da água residual é usada como adubo nas lavouras. Como, no entanto, apenas uma pequena parte é usada como ração e a deposição da água residual pode levar ao excesso de adubo nas plantações e salinização do lençol freático, é necessária uma solução a médio prazo.

Uma das alternativas é aproveitar esses subprodutos em usinas de biogás, já que são substratos com boa degradabilidade. As características físico-químicas são mostradas nas tabelas 4.6 e 4.7.

Esses substratos não necessitam de medidas especiais de higiene ou armazenamento. Todavia, deve-se considerar que os efluentes do processamento de batata e as águas residuárias armazenadas em reservatórios exigem energia extra para serem aquecidas antes do processo de digestão.

4.2.5 Produção de açúcar

Os diversos subprodutos oriundos do processamento da beterraba sacarina na produção de açúcar refinado são utilizados como ração animal. Deles fazem parte as chamadas tortas de filtro úmidas, geradas após a trituração da beterraba seguida da extração do açúcar, e o melaço, que sobra após a separação dos cristais de açúcar do xarope engrossado. Uma parte da torta é misturada com melaço e dessa mistura é extraída a água por compressão, originando a torta de melaço,

igualmente destinada à alimentação de animais [4-17, 4-18].

Além de servir como ração, o melaço também é utilizado como matéria-prima em fábricas de fermento ou destilarias. Embora isso restrinja drasticamente a quantidade disponível, a torta de filtro da beterraba e o melaço, em virtude do teor residual de açúcar, são um cossubstrato adequado para a produção de biogás (ver anexo 4.8, tabela 4.9).

No momento, são desconhecidos requisitos de armazenagem e utilização. A torta de filtro prensada é ensilada com vistas a prolongar a preservação, o que pode ser feito tanto como substrato isolado em tubos de plástico como na forma de substrato misto, p. ex. silagem de milho. O melaço é armazenado em reservatórios apropriados. Em função da sazonalidade da beterraba sacarina e seus subprodutos (setembro a dezembro), a armazenagem se faz necessária para garantir a disponibilidade de tortas prensadas e melaço durante o ano inteiro.

4.2.6 Subprodutos do beneficiamento de frutas

Na produção de vinho e suco a partir de uvas e frutas, são gerados bagaços como subprodutos, que, graças ao elevado teor de açúcar, são favorecidos como matéria-prima para a produção de álcool. Os bagaços também são utilizados como ração animal ou matéria-prima básica na fabricação de pectina. Cada hectolitro de vinho ou suco de fruta gera cerca de 25 kg de bagaço e cada hectolitro de néctar de fruta gera cerca de 10 kg de bagaço [4-12]. As propriedades mais importantes são mostradas nas tabelas 4.6 e 4.7.

Não são esperados materiais estranhos por causa dos processos de produção anteriores. A higienização também não é necessária. É preciso ensilar os substratos caso sejam armazenados por períodos mais prolongados.

4.3 Subproduto vegetal conforme a EEG

A seguir, é apresentada uma lista completa dos subprodutos vegetais conforme a EEG (lista positiva de subprodutos vegetais), com as produções de biogás previstas na legislação (ver capítulo 7.3.3.2). Para permitir a comparação com os substratos citados neste capítulo, a produção padrão de biogás estipulada por lei (em kWh_{el}/t MF) foi convertida em produção de metano (tabela 4.5). A conversão presume uma eficiência elétrica da usina de cogeração de 37% e um po-

der calorífico inferior do metano de 9,97 kWh/Nm³ (ver tabela 4.5).

O problema fundamental é que a legislação fornece valores apenas muito aproximados das propriedades dos subprodutos. Como na prática as propriedades dos subprodutos que condicionam o rendimento do biogás variam extremamente, sobretudo o teor de matéria seca e o teor residual de óleo (ver capítulo 4.2), há a possibilidade de grandes discrepâncias entre os rendimentos previstos na lei e aqueles efetivamente atingidos. Isso resulta inevitavelmente em uma superestimativa ou subestimativa dos rendimentos de biogás de subprodutos vegetais permitidos.

4.4 Propriedades e produção de subprodutos vegetais

As tabelas a seguir contêm as propriedades e produções de gás de substratos selecionados do capítulo 4.2. Desde que disponíveis, são apresentados tanto as amplitudes dos diferentes parâmetros quanto o respectivo valor médio. A variação das propriedades e das produções, em alguns casos substancial, evidencia o fato de que na prática a "qualidade do substrato" é bastante heterogênea e depende de diversos fatores ligados ao modo como ele é produzido. O propósito dos dados aqui apresentados é servir como orientação, ressaltando que na prática os resultados podem ser sensivelmente melhores ou piores.

4.5 Resíduos verdes e grama

As atividades de conservação de parques e arborização viária nas cidades são responsáveis pela produção de grandes quantidades de resíduos verdes, grama e resíduos de poda. Para um abastecimento contínuo das usinas durante todo o ano, esses resíduos devem ser ensilados, uma vez que são produzidos em regime sazonal. A ensilagem, porém, é recomendável apenas em determinados casos, uma vez que a produção esparsa dos resíduos implica custos de transporte elevados. Se os volumes gerados forem pequenos e em períodos irregulares, recomenda-se o carregamento do material em estado fresco. Todavia, o carregamento deve ser realizado com muito cuidado, uma vez que as bactérias têm de se adaptar primeiro à qualidade do substrato. Em caso de quantidades muito grandes, o processo corre o risco de sofrer distúrbios. A tabela 4.8 apresenta algumas propriedades importan-

Tabela 4.7: Produções de substratos selecionados da agroindústria [4-1], [4-2], [4-12], [4-15], ajustadas

Substrato		Produção de biogás	Produção de metano	Rendimento de metano
		[Nm ³ /t de substrato]	[Nm ³ /t de substrato]	[Nm ³ /t de MOS]
Bagaço do malte	Δ	105-130	62-112	295-443
	∅	118	70	313
Grãos destilados de cereais	Δ	30-50	18-35	258-420
	∅	39	22	385
Resíduo do destilado de batata	Δ	26-42	12-24	240-420
	∅	34	18	362
Resíduo do destilado de frutas	Δ	10-20	6-12	180-390
	∅	15	9	285
Glicerol bruto	Δ	240-260	140-155	170-200
	∅	250	147	185
Torta de canola	∅	660	317	396
Polpa de batata	Δ	70-90	44-50	358-413
	∅	80	47	336
Água residual da batata	Δ	50-56	28-31	825-1100
	∅	53	30	963
Torta de filtro de beterraba sacarina	Δ	60-75	44-54	181-254
	∅	68	49	218
Melaço	Δ	290-340	210-247	261-355
	∅	315	229	308
Bagaço de maçã	Δ	145-150	98-101	446-459
	∅	148	100	453
Bagaço de uva	Δ	250-270	169-182	432-466
	∅	260	176	448

Δ: Faixa dos valores medidos; ∅: Média

tes como o rendimento de biogás e o teor de metano. Geralmente, resíduos verdes como podas e cortes de gramas são destinados à compostagem em vez de serem aproveitados para a geração de biogás.

Excetuando-se os desafios logísticos já mencionados, a ensilagem é processada sem dificuldades. Conforme o tipo do resíduo, deve ser separado de materiais estranhos como galhos ou pedras antes de ser carregado no biodigestor.

Tabela 4.8: Propriedades dos resíduos verdes [4-12], [4-19]

Substrato	MS [%]	MOS [% MS]	N [% MS]	P ₂ O ₅	Produção de biogás [Nm ³ /t MF]	Produção de metano [Nm ³ /t MF]	Rendimento de metano [Nm ³ /t de MOS]
Resíduos verdes	12	87	2,5	4	175	105	369

4.6 Material proveniente de atividades de conservação da paisagem

O conceito de material proveniente das atividades de conservação da paisagem abrange o produto das atividades agrícolas e hortícolas que sirvam primariamente à conservação da paisagem [4-20]. As áreas que produzem esse tipo de material são as áreas de proteção ambiental e aquelas em que se realizam medidas para a proteção da vegetação. Alguns exemplos são resíduos de corte e poda de reservas naturais, áreas de proteção voluntária, áreas de programas agrícola-ambientais e demais programas de fomento equivalentes. Além disso, considera-se também como material de conservação da paisagem os resíduos verdes municipais, os resíduos verdes provenientes da conservação de jardins e parques públicos ou privados, o material produzido na manutenção de campos esportivos e de golfe, bem como os resíduos da conservação de faixas verdes à margem de cursos d'água. Normalmente a conservação de áreas naturais protegidas se dá apenas uma vez por ano, o que explica o fato de o material conter elevados conteúdos de matéria seca e lignina. Disso decorrem produções de gás reduzidas e menor aptidão para a ensilagem. Adicionalmente, o uso dos materiais descritos exige técnicas e procedimentos especiais que atualmente são muito caros ou ainda não estão tecnicamente amadurecidos. Por outro lado, os materiais das atividades de conservação que visam manter a vegetação, tais como gramados municipais e de campos de esportes e golfe, têm baixo teor de lignina e portanto são mais facilmente degradados.

Para obter o direito ao bônus de conservação da paisagem de 2 centavos de euro por kWh_{el}, mais de 50% em peso do material utilizado (com base na matéria fresca) devem ser provenientes da conservação da paisagem (ver também capítulo 7.3.3.2).

4.7 Fontes bibliográficas

- [4-1] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL): Faustzahlen Biogas; Darmstadt, 2007
- [4-2] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL): Faustzahlen Biogas; 2ª ed., Darmstadt, 2009
- [4-3] Weiland, P.: Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI-Berichte, nº 1620 "Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven"; pp. 19 – 32; VDI-Verlag 2001
- [4-4] Weiland, P. et al.: Bundesweite Evaluierung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen; 16. Symposium Bioenergie-Festbrennstoffe, Biokraftstoffe, Biogas; Bad Staffelstein 2007, pp. 236 – 241
- [4-5] Weiland, P.: Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und –erzeugung in Deutschland; Gülzower Fachgespräche, volume 15: Energetische Nutzung von Biogas: "Stand der Technik und Optimierungspotenzial"; pp. 8 – 27; Weimar 2000
- [4-6] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen; Gülzow, 2008
- [4-7] Karpenstein-Machan, M.: Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber, DLG Verlag; Frankfurt/M., 2005
- [4-8] Dörfler, H. (Hrsg.): Der praktische Landwirt; 4ª ed.; BLV Verl.-Ges., Munique; 1990
- [4-9] Hassan, E.: Untersuchungen zur Vergärung von Futterrübensilage; BLE-Projekt Az. 99UM031; Abschlußbericht; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig; 2001
- [4-10] Schattauer, A.: Untersuchungen zur Biomethanisierung von Zuckerrüben; Masterarbeit angefertigt im Institut für Technologie und Biosystemtechnik; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL); Braunschweig; 2002
- [4-11] Bischoff, M.: Erkenntnisse beim Einsatz von Zusatz- und Hilfsstoffen sowie Spurenelementen in Biogasanlagen; VDI Berichte, nº 2057; "Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft"; VDI Verlag, Düsseldorf 2009, pp. 111 – 123
- [4-12] Wilfert, R.; Schattauer, A.: Biogasgewinnung und –nutzung – Eine technische, ökonomische und ökologische Analyse; DBU-Projekt, 1. Zwischenbericht; Institut für Energetik und Umwelt GmbH, Leipzig; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig; 2002

- [4-13] Anônimo: Die Herstellung von Biodiesel; innovas news; Anwendungsbeispiel Biogas 3/98; Munique, 1998
- [4-14] Wesolowski, S.; Ferchau, E.; Trimis, D.: Untersuchung und Bewertung organischer Stoffe aus landwirtschaftlichen Betrieben zur Erzeugung von Biogas in Co- und Monofermentationsprozessen; Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Heft 18/2009; Dresden, 2009
- [4-15] Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Amon, B.; Schreiner, M.: Untersuchungen zur Wirkung von Rohglycerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle; Universität für Bodenkultur Wien, Department für Nachhaltige Agrarsysteme; Viena, 2004
- [4-16] Umweltbericht; Emsland-Stärke; download em 16.09.2002; www.emsland-staerke.de/d/umwelt.htm
- [4-17] Schnitzel und Melasse – Daten, Fakten, Vorschriften; Verein der Zuckerindustrie; Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 1996
- [4-18] Konzept zur Qualität und Produktsicherheit für Futtermittel aus der Zuckerrübenverarbeitung; Broschüre; 2ª ed.; Verein der Zuckerindustrie; 2003
- [4-19] KTBL Arbeitspapier 249 – Kofermentation; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft – KTBL; Darmstadt 1998
- [4-20] Recomendação da Agência de Esclarecimento EEG de 24.09.2009, <http://www.clearingstelle-eeg.de/EmpfV/2008/48>



Fonte: Kuhn (LWG)

4.8 Anexo

Tabela 4.9: Resumo das propriedades dos substratos

Substrato	MS [%]	MOS [% MS]	N ^a	P ₂ O ₅ [% MS]	K ₂ O	Produção de biogás [Nm ³ /t MF]	Produção CH ₄ [Nm ³ /t MF]	Rendimento CH ₄ [Nm ³ /t de MOS]
Aducos orgânicos								
Esterco líquido bovino	10	80	3,5	1,7	6,3	25	14	210
Esterco líquido suíno	6	80	3,6	2,5	2,4	28	17	250
Esterco bovino	25	80	5,6	3,2	8,8	80	44	250
Esterco de aves	40	75	18,4	14,3	13,5	140	90	280
Esterco de cavalo sem palha	28	75	N.E.	N.E.	N.E.	63	35	165
Biomassas dedicadas								
Silagem de milho	33	95	2,8	1,8	4,3	200	106	340
SPI de cereal	33	95	4,4	2,8	6,9	190	105	329
Silagem de centeio verde	25	90				150	79	324
Grãos de cereais	87	97	12,5	7,2	5,7	620	329	389
Silagem de gramíneas	35	90	4,0	2,2	8,9	180	98	310
Beterraba sacarina	23	90	1,8	0,8	2,2	130	72	350
Beterraba forrageira	16	90	N.E.	N.E.	N.E.	90	50	350
Silagem de girassol	25	90	N.E.	N.E.	N.E.	120	68	298
Capim-sudão	27	91	N.E.	N.E.	N.E.	128	70	286
Sorgo sacarino	22	91	N.E.	N.E.	N.E.	108	58	291
Centeio verde ^b	25	88	N.E.	N.E.	N.E.	130	70	319
Substratos da indústria de transformação								
Bagaço do malte	23	75	4,5	1,5	0,3	118	70	313
Grãos destilados de cereais	6	94	8,0	4,8	0,6	39	22	385
Resíduo do destilado de batata	6	85	9,0	0,7	4,0	34	18	362
Resíduo do destilado de frutas	2,5	95	N.E.	0,7	N.E.	15	9	285
Glicerol bruto ^c	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	250	147	185
Torta prensada de canola	92	87	52,4	24,8	16,4	660	317	396
Polpa de batata	13	90	0,8	0,2	6,6	80	47	336
Água residual da batata	3,7	73	4,5	2,8	5,5	53	30	963
Torta de filtro prensada de beterraba	24	95	N.E.	N.E.	N.E.	68	49	218
Melaço	85	88	1,5	0,3	N.E.	315	229	308
Bagaço de maçã	35	88	1,1	1,4	1,9	148	100	453
Bagaço de uva	45	85	2,3	5,8	N.E.	260	176	448
Resíduos verdes e grama								
Resíduos verdes	12	87,5	2,5	4,0	N.E.	175	105	369

a. Teores de nitrogênio em biofertilizantes sem considerar perdas durante armazenamento

b. Submetido ao murchamento

c. Resultados extremamente variáveis na prática, dependendo da técnica de fabricação do biodiesel.

Operação de Usinas de Biogás



A lucratividade de uma usina de biogás corretamente planejada é determinada pela disponibilidade e utilização da capacidade do processo como um todo. Como fatores condicionantes, a tecnologia utilizada tem de oferecer segurança operacional e funcionalidade, e o processo biológico deve proporcionar uma capacidade de degradação elevada e constante.

Em vista do fato de que os equipamentos sempre estão sujeitos a falhas, devem estar disponíveis instrumentos que detectem tais falhas, identifiquem os erros e permitam o seu reparo. O controle do processo sempre ocorre em interação com os operadores, sendo que o grau de automação pode variar muito. A automação de algoritmos de monitoração e controle tem a vantagem de tornar essas operações contínuas e dar uma certa liberdade ao pessoal técnico. A transmissão remota de dados permite que o processo seja monitorado sem a presença da equipe na usina. A automação extensiva tem como desvantagem o custo elevado. Como essas vantagens e desvantagens devem ser avaliadas conforme as especificações da usina, não existe uma configuração padrão de equipamentos de controle para usinas de biogás. Os instrumentos utilizados têm de ser adaptados às condições específicas.

A seguir, serão analisados primeiramente os parâmetros que podem ser medidos para monitorar o processo biológico.

As descrições se referem a usinas de digestão úmida. As especificações divergentes dos digestores de baía são indicadas onde necessário.

5.1 Dados característicos da monitoração do processo biológico

Monitorar e controlar o processo biológico representa um desafio. Em situação normal, o objetivo da decomposição anaeróbia no setor agrícola é atingir uma taxa constante de produção de metano. O tipo de processo

mais utilizado é o reator (semi)contínuo de mistura completa (CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor). Ele permite atingir uma produção de metano constante após se estabilizar o estado operacional. No estado estacionário, as alterações dos parâmetros do processo são iguais a zero e são atingidas as taxas de produção específicas máximas [5-26].

$$V \frac{dS}{dt} = Q_{entrada} \cdot S_o - Q_{saida} \cdot S + V \cdot r_s = 0$$

Equação 5.1: Estado estacionário (Q: fluxo volumétrico ($l \cdot d^{-1}$) (entrada, saída), V: volume de reação (l), r_s : taxa de reação $g \cdot (d \cdot l)^{-1}$, S_o : concentração do substrato na entrada ($g \cdot l^{-1}$), S: concentração do substrato ($g \cdot l^{-1}$))

Parâmetros como carga orgânica volumétrica, tempo de retenção, taxa de degradação máxima e taxa de produção de gás, portanto, são definidos pelo dimensionamento da usina e pelo substrato utilizado. Esses parâmetros têm de ser mantidos tão constantes quanto possível pelo operador da usina. O estado estacionário, contudo, não pode ser atingido na prática, uma vez que é impossível excluir completamente a possibilidade de falhas (p. ex. alterações das propriedades do substrato, paradas de bombas, introdução de desinfetantes no sistema, etc.). Essas falhas levam a desvios do estado ideal, que precisam ser detectados a fim de que a causa possa ser identificada e o problema sanado.

Esse desvio do estado estacionário pode ser detectado diretamente pela diferença entre os fluxos de matéria. Na prática, porém, a medição precisa da composição da matéria que entra e sai é algo oneroso e, em muitos casos, até mesmo a medição do substrato efetivamente introduzido e do volume de gás de fato produzido é problemática, o que inviabiliza o cálculo preciso sem lançar mão de caros métodos e equipa-

mentos. Por isso, em muitas usinas se adotam soluções parciais que nem sempre bastam para garantir estabilidade ao processo.

A seguir, são apresentados os parâmetros de medição mais usuais e disponíveis para a avaliação do processo biológico.

5.1.1 Taxa de produção de biogás

Na qualidade de produto metabólico e balizador de resultados, o biogás gerado é um importante parâmetro de medição. A taxa de produção de biogás é o volume de gás produzido por unidade de tempo (p. ex. d^{-1}) e, nos casos em que a quantidade de alimentação e a composição do substrato são conhecidas, serve de base para o cálculo da produção de biogás específica (relativamente ao volume e ao substrato). A medição da taxa de produção de biogás é indispensável para calcular o balanço dos processos metabólicos e para avaliar o desempenho da população metanogênica.

A instalação de aparelhos de medição de fluxos gasosos deve observar o posicionamento dos sensores. Quando o objetivo for acompanhar o estado do processo em cada digestor, cada taxa de produção de gás deverá ser medida separadamente. No caso de tetos de lona, o cálculo da produção de gás deve levar em conta o volume de armazenamento, o que é possível pela medição do nível de enchimento (p. ex. com sensor de posição dotado de cabo), da pressão interna e da temperatura no gasômetro. Sensores instalados no interior do gasômetro devem satisfazer as exigências de proteção contra explosões e se caracterizar pela resistência à corrosão e elevada umidade. Como os tetos de lona também servem para o armazenamento de biogás, a medição da produção de gás e do volume de armazenamento disponível é de grande importância para o controle da energia produzida na usina de cogeração.

Na medição dos fluxos de gás em tubulações, é necessário respeitar os trechos de entrada definidos pelo fabricante para que se forme o escoamento laminar. Aparelhos de medição com partes móveis expostas ao fluxo de biogás são suscetíveis a defeitos em virtude das impurezas nele contidas. No ramo de biogás, são utilizados aparelhos que funcionam com o princípio de medição térmica, por fluidistor e por medidor de vazão tipo vórtex.

5.1.2 Composição do gás

A composição do biogás serve de auxílio para avaliar diferentes aspectos. Cada um dos componentes e sua importância no processo são explicados a seguir.

5.1.2.1 Metano

A fração de metano no biogás é um indicativo do estado da biocenose metanogênica. A taxa de produção de metano pode ser calculada com base na taxa de produção de gás – quando essa se reduz drasticamente mesmo sob alimentação constante de substrato, isso indica uma inibição das arqueas metanogênicas. Para a avaliação da produtividade de metano, cada biodigestor deve ser dotado de pontos de medição. Em tecnologia de biogás, as concentrações de metano são medidas por meio de sensores infravermelhos ou de condutividade térmica.

Para a usina de cogeração, é importante que o teor de metano no gás não caia abaixo de 40% - 45%, pois teores baixos impedem que os motores possam operar com o biogás.

5.1.2.2 Dióxido de carbono

O dióxido de carbono é formado na fase de hidrólise/acidogênese e na formação de metano. Ele se dissolve na água formando o importante tampão de bicarbonato. O decréscimo da relação metano/dióxido de carbono no biogás, sem que tenha havido alteração na composição do substrato, pode ter como causa o aumento da acidogênese em relação à metanogênese. Quando isso ocorre, o equilíbrio dos fluxos de massa no processo de digestão fica perturbado. A causa pode residir em uma oscilação da quantidade de entrada ou uma inibição da população metanogênica.

Assim como o metano, o dióxido de carbono também é medido por meio de sensores infravermelhos ou de condutividade térmica.

5.1.2.3 Oxigênio

O oxigênio só pode ser detectado no biogás quando adicionado para a biodessulfurização. Assim, a medição do oxigênio pode ser exigida para ajustar o teor de oxigênio necessário para a dessulfurização. O oxigênio pode ser medido com sensores eletroquímicos e sensores paramagnéticos.

5.1.2.4 Sulfeto de hidrogênio

Os fabricantes de usinas de cogeração fornecem valores-limite para a concentração de sulfeto de hidrogênio, uma vez que seus produtos de oxidação têm acentuadas propriedades corrosivas. A medição, portanto, serve primeiramente para proteger a usina de cogeração.

As arqueas metanogênicas somente são afetadas por concentrações de sulfeto de hidrogênio superiores a cerca de 20.000 ppm, o que raramente ocorre em usinas de biogás agrícolas. O sulfeto de hidrogênio é medido com sensores eletroquímicos.

5.1.2.5 Hidrogênio

O hidrogênio é um importante composto intermediário na formação de metano, liberado primordialmente na acidogênese e na acetogênese antes de ser convertido em metano. Muitos esforços já foram empreendidos para utilizar a concentração de hidrogênio no biogás para detectar distúrbios no processo. De maior importância é o fato de que a formação de ácido acético, a partir de ácidos graxos de cadeias longas, e a conversão de hidrogênio em metano teoricamente só podem ocorrer concomitantemente em uma estreita faixa de concentração. A utilidade desse parâmetro é questionável, pois a relação entre a concentração de hidrogênio no biogás e os distúrbios nem sempre é tão clara. A concentração do hidrogênio no biogás armazenado pode ser facilmente medida por meio de sensores eletroquímicos. O papel da pressão parcial do hidrogênio no substrato de fermentação como parâmetro de controle foi pouco investigado até o momento.

A maioria dos fabricantes de aparelhos de análise de gases no ramo de biogás oferece equipamentos modulares que permitem ao usuário escolher os tipos de sensores e pontos de medição. É preciso observar que os sensores eletroquímicos são "consumidos" e apresentam deriva mais acentuada que, p. ex., os sensores infravermelhos. É necessário, também, realizar a calibração regular dos sensores.

5.1.3 Temperatura

Geralmente, com o aumento da temperatura se dá também o aumento da velocidade de reação. No entanto, os processos biológicos apresentam pontos ótimos de temperatura, uma vez que estruturas orgânicas (p. ex. proteínas) se tornam instáveis em ambientes de temperatura elevada e deixam de funcionar. A

aplicação técnica de processos anaeróbios diferencia principalmente duas faixas de temperatura:

- faixa mesofílica de aprox. 37 a 43 °C
- faixa termofílica de aprox. 50 a 60 °C

Como a fermentação anaeróbia quase não produz calor (com a exceção de algumas usinas que processam biomassa), o substrato tem que ser aquecido até a temperatura de fermentação. Em seguida, é importante que a temperatura permaneça constante. Em especial o processo termofílico é particularmente sensível a oscilações de temperatura.

Algumas usinas que utilizam silagem de milho apresentam aquecimento, o que pode exigir medidas de arrefecimento.

Os sensores para a medição da temperatura devem ser instalados em diferentes alturas para permitir a detecção de camadas e agitação insuficiente. Deve-se também garantir que os sensores não sejam posicionados em zonas mortas ou muito próximos das unidades de estabilização da temperatura. Para a medição da temperatura utilizam-se sensores de resistência (p. ex. PT 1000 ou PT 100), ou termopares.

5.1.4 Quantidade de entrada e nível de enchimento

O cálculo do balanço dos processos de digestão pressupõe a medição precisa da quantidade de substrato carregada. Uma vez que além dos substratos líquidos também são carregados sólidos no digestor, são necessários diferentes sistemas de medição.

O ideal é a pesagem dos sólidos, realizada por meio de carregadeiras dotadas de balança ou equipamentos de pesagem localizados nos sistemas de introdução do substrato. Estes são mais precisos e fáceis de integrar em controles de processo automatizados que aqueles. Os equipamentos de pesagem se utilizam de sensores de pressão que exigem que os reservatórios "flutuem". Portanto, deve-se evitar o acúmulo de impurezas na área desses sensores, bem como o enchimento do reservatório de alimentação durante a introdução do substrato.

Os substratos líquidos podem ser medidos por equipamentos de medição de vazão localizados na tubulação. Se a usina utilizar tanque de carga, o volume também pode ser determinado por medidores de nível.

Os níveis de enchimento (também dos biodigestores) podem ser determinados por sensores de pressão (pressão hidrostática no biodigestor) ou medidores de distância até a superfície mediante ultrassom ou radar. A escolha dos sensores deve levar em conta a sua resistência à corrosão e a impurezas, especialmente

devido à sua cara manutenção no digestor. Na escolha e no posicionamento dos sensores, deve-se observar que o seu funcionamento não seja prejudicado por fatores como sedimentação no fundo do biodigestor (p. ex. areia), formação de espuma e depósitos de enxofre no gasômetro. Garantir também que o equipamento esteja protegido contra explosões.

Aparelhos em partes móveis no meio medido se provaram ser a melhor opção para equipamentos de medição de vazão. São utilizados principalmente sensores capacitivos e indutivos. Em alguns casos, utilizam-se também sensores de ultrassom e de condutividade térmica. Conforme o método, deve-se observar que, antes dos sensores, o trecho de entrada no tubo seja suficientemente longo para permitir a formação do escoamento laminar. A medição da vazão tem a vantagem de permitir a monitoração de várias linhas com um só aparelho nos casos em que a disposição adequada de válvulas possibilita que várias linhas de carregamento sejam encaminhadas por um tubo.

5.1.5 Caracterização do substrato

O cálculo do balanço de massa, além da quantidade de substrato carregado, exige também informações sobre a sua concentração e composição.

Para determinar a concentração, são tomados parâmetros compostos como o teor de matéria seca (MS) e o teor de matéria orgânica seca (MOS). Para substratos líquidos, pode-se usar também a demanda química de oxigênio (DQO), embora não raro seja adotado o carbono orgânico total (COT). Para fins práticos, somente os dois primeiros são relevantes.

O primeiro passo para conhecer a fração biodegradável do substrato se dá pela determinação do teor de umidade ou teor de matéria seca. Para isso, uma amostra é seca a 105 °C em laboratório até atingir um peso constante. Atualmente já existem modernos sensores que, por meio de micro-ondas e infravermelho próximo, permitem determinar o teor de umidade na própria linha do processo.

A determinação da fração de componentes orgânicos na matéria seca é um ponto de referência para conhecer a degradabilidade. A matéria orgânica seca é um parâmetro composto obtido pela calcinação da amostra seca a 550 °C. A perda de massa, também denominada perda ao fogo, representa a matéria orgânica seca. Esse parâmetro composto, no entanto, nada diz a respeito da degradabilidade ou da produção de

biogás esperada da matéria analisada. A literatura cita valores de referência que permitem estimar a produção de gás esperada, dado um determinado substrato e seu teor de MOS. Durante a secagem da amostra, são expulsas substâncias voláteis como os ácidos voláteis a vapor, que não entram no resultado da análise. Principalmente no caso de substratos acidificados (p. ex. silagens) podem ocorrer grandes desvios na estimativa do potencial de gás. Por isso, Weissbach desenvolveu um fator de correção que considera as substâncias voláteis. Esse procedimento, no entanto, é bem mais trabalhoso [5-18].

Na calcinação da amostra, sobra o resíduo da calcinação, que representa a fração de componentes inertes do substrato. Em substratos arenosos, o resíduo da calcinação permite estimar a porcentagem de areia em combinação com a peneiração e classificação dos grãos [5-19]. A relevância do conteúdo de areia se explica pelas suas características abrasivas e pela sedimentação, no biodigestor, de alguns substratos (p.ex. esterco de aves).

Um maior detalhamento da caracterização do substrato é proporcionado pela classificação dos seus componentes (fibra bruta, proteína bruta, gordura bruta e extrativos não nitrogenados, que, combinados com fatores de digestibilidade, descrevem a aptidão de substâncias orgânicas como ração; ver também 2.3.4.1) ou pelo método de Van Soest (hemicelulose, celulose e lignina). Os componentes determinam os tipos dos compostos intermediários formados. Assim, a mudança brusca do substrato pode rapidamente elevar a concentração de compostos intermediários não degradáveis pela falta ou crescimento lento da respectiva população de bactérias. Com o auxílio da análise bromatológica de rações, é possível, com base no teor de matéria orgânica seca, prever com maior precisão a produção de gás esperada. Essa análise, portanto, é mais adequada para a avaliação da qualidade dos substratos.

A determinação da concentração do substrato é um fator indispensável para a confiabilidade do balanço de massas. A determinação complementar da composição também pode ser usada para avaliar a qualidade do substrato.

5.1.6 Determinação da concentração de ácidos orgânicos

Os ácidos orgânicos são compostos intermediários originados na produção do biogás. Eles sofrem dissociação em solução aquosa dependendo do valor do

pH. As partes constituintes são calculadas da seguinte forma:

$$f = \frac{10^{pK_s - pH}}{1 + 10^{pK_s - pH}}$$

Equação 5.2: Cálculo do fator de dissociação conforme [5-20] (f: fator de dissociação, pK_s : logaritmo negativo da constante de acidez na base 10; pH: valor do pH)

Em estado estacionário, a velocidade da acidogênese é igual à da conversão, o que mantém constante a concentração no biodigestor. Se houver uma formação acentuada de ácidos e/ou a sua decomposição for inibida, os ácidos formados se acumulam e sua concentração aumenta. Uma vez que, segundo as Leis de Monod, o crescimento bacteriano é dependente da concentração do substrato, o aumento da concentração de ácidos implica uma taxa de crescimento maior, o que estabiliza o processo em determinados limites. Caso, porém, a taxa de formação dos ácidos exceder em caráter persistente a capacidade dos microrganismos de decompor os ácidos, a concentração continua a se elevar. Na ausência de intervenção, os ácidos continuam se acumulando até atingir o ponto em que a capacidade de tamponamento do substrato de fermentação se esgota e o pH decai. A degradação dos ácidos é inibida pela concentração elevada da fração não dissociada de ácidos, sendo esse efeito reforçado pela queda do valor do pH.

É difícil traçar um limite de concentração de ácido máxima permitida no estado estacionário, já que o equilíbrio da concentração é condicionado por fatores como o tempo de retenção, o substrato utilizado e a presença de substâncias inibidoras.

A título de orientação, são fornecidos na tabela 5.1 alguns valores relatados na literatura.

Para avaliar o processo, o mais importante é que a concentração de ácidos permaneça constante. A elevação da concentração de ácidos exige cuidado redobrado. Para avaliar o processo em condições dinâmicas, ou seja, com oscilações nas concentrações de ácidos, é necessário o uso de modelos de processo.

Além do parâmetro composto dos ácidos, as suas concentrações separadamente podem fornecer informações complementares. Se o espectro indicar que os ácidos de cadeias longas aumentam mais que o ácido acético, isso significa que a sua conversão em ácido acético foi inibida. Essa conversão de ácidos de cadeia longa em ácido acético é um processo endógeno que acontece somente a baixas concentrações de hidrogê-

Tabela 5.1: Limites máximos permitidos da concentração de ácidos

Autor	Limite Concentração Equivalente de ácido acético (mg · l ⁻¹)	Técnica, comentário
[5-20]	200 ácidos não dissociados	Reator perfeitamente agitado, termofílico, com reator hidrolítico a montante
[5-20]	300 (biocenose adaptada) ácidos não dissociados	Reator perfeitamente agitado, termofílico, com reator hidrolítico a montante
[5-21]	30-60 ácidos não dissociados	Reator contínuo de mistura completa, mesofílico (CSTR)
[5-2]	80 (aumento da inibição a partir de 20) ácidos não dissociados	N.E.
[5-22]	100-300 Ácidos totais	Digestão de lodo em estado normal de processo
[5-22]	1.000-1.500 Ácidos totais	Digestão normal de lodo durante fase de partida
[5-22]	1.500-2.000 Ácidos totais	Digestão de lodo, risco de parada; reduzir alimentação ou adição de álcalis
[5-22]	4.000 Ácidos totais	Digestão de lodo; chances reduzidas de correção em curto prazo
[5-23]	< 1.000 Ácidos totais	digestão estável

nio. Além do mais, é pequena a taxa de crescimento desses microrganismos. Em função dessas condições desfavoráveis, esse subprocesso pode significar um gargalo no processo como um todo. Assim, elevadas concentrações de ácido propiônico são degradadas apenas lentamente.

Algumas publicações citam a relação entre ácido acético e ácido propiônico como parâmetro de avaliação do processo. Até o momento, porém, não foi possível estabelecer um padrão amplamente válido.

Existem diferentes técnicas para determinar a concentração de ácidos orgânicos (atualmente essas análises exigem que se retire uma amostra para ser encaminhada ao laboratório), tais como:

- parâmetro composto (p. ex. destilação a vapor conforme a DIN 38414-19)
- espectro (p. ex. cromatografia gasosa) ou

- com base em parâmetros empíricos resultantes da titulação (AOV – ácidos orgânicos voláteis)

Dado o uso crescente do valor AOV, a determinação do parâmetro composto conforme a DIN 38414-19 praticamente não é mais realizada. Embora seja mais precisa que a determinação do valor AOV, é mais trabalhosa por exigir a destilação dos ácidos voláteis a vapor.

A determinação do espectro de ácidos mediante cromatografia gasosa (opcionalmente também por cromatografia líquida) exige tecnologias de medição caras e experiência com o substrato. Essa técnica permite obter não apenas a concentração total de ácidos, mas também as concentrações das frações de ácidos graxos de cadeias curtas. Esse é o mais preciso entre os métodos mencionados.

Nos últimos anos, o AOV tem se destacado pela facilidade com que pode ser medido [5-24]. Esse valor é geralmente utilizado em combinação com o valor TAC (AOV/TAC).

A relação AOV/TAC é obtida por titulação. A origem da abreviatura TAC é incerta. Nenhuma das diferentes denominações mencionadas na literatura é perfeitamente correta e corresponde às letras da abreviatura. O TAC é o "consumo A" de 0,1 N de ácido sulfúrico na titulação de uma amostra com pH até 5. A quantidade consumida de ácido é convertida na respectiva concentração de carbonato de cálcio (mg CaCO₃/l). Se a titulação prosseguir até o pH 4,4, é possível deduzir a concentração de ácidos orgânicos do "consumo de ácidos B". As fórmulas para calcular a concentração dos ácidos são empíricas:

Quantidade de amostra: 20 ml (centrifugado)

TAC: Consumo A x 250 [mg/l CaCO₃]

AOV: ((consumo B x 1,66) - 0,15) x 500 [mg/l HAC]

Com frequência, a relação AOV/TAC é usada para avaliar o processo. Vale ressaltar que, dada a natureza empírica das fórmulas, os resultados das análises de diferentes processos não podem ser comparados entre si. A experiência mostra que a relação AOV/TAC não pode ser superior a 0,8. Aqui também há exceções e, no caso dos ácidos, é possível detectar problemas pela observação da variação do valor. Ao avaliar os resultados, deve-se considerar o método utilizado para os cálculos.

5.1.7 Valor do pH

Os processos biológicos são em grande parte governados pelo valor do pH. A faixa de pH ótima para a for-

mação de metano é estreita e se situa entre cerca de 7 e 7,5, embora a formação de gás também seja possível acima e abaixo dessa faixa. Em sistemas de um estágio, normalmente o pH se estabiliza em uma faixa ótima, pois os grupos de bactérias constituem um sistema autorregulado. O valor do pH na fase de hidrólise do sistema de dois estágios é nitidamente inferior, estando normalmente entre 5 e 6,5, faixa essa ideal para as bactérias fermentativas acidogênicas. Graças à capacidade de tamponamento do meio e da atividade de degradação, na fase metanogênica o valor do pH retorna à faixa neutra.

O valor do pH controla o equilíbrio de dissociação de importantes produtos metabólicos como a amônia, ácidos orgânicos e sulfeto de hidrogênio. A capacidade de tamponamento do meio (geralmente por bicarbonato e amônio) normalmente garante a estabilidade do valor do pH. Se no entanto o pH sofrer variações drásticas e se deslocar da faixa ideal, isso é geralmente um indicativo de distúrbios graves, que exigem medidas de correção urgentes.

5.1.8 Concentração de micronutrientes

Os micronutrientes são minerais que ocorrem em concentrações muito baixas. Usinas que operam exclusivamente com biomassa (e aquelas utilizando grãos destilados) estão sujeitas a distúrbios no processo, os quais podem ser corrigidos pela adição de micronutrientes. Os distúrbios se manifestam pela queda na produção de gás e pelo aumento da acidez. Esses fenômenos não se observam em usinas alimentadas por esterco líquido. A concentração de micronutrientes nas biomassas dedicadas é significativamente inferior àquela encontrada em adubos orgânicos. Os mecanismos precisos por trás desse fato e as substâncias efetivamente limitantes, no entanto, não puderam ser identificados [5-26].

Diversos fornecedores oferecem misturas de micronutrientes para otimizar os processos. Há indícios de que a adição de íons de ferro na forma de cloreto de ferro ou hidróxido de ferro, frequentemente utilizado para a dessulfurização, pode proporcionar um efeito estabilizador. Isso se explica pelo fato de o sulfeto formar sulfeto metálico de baixa solubilidade, restringindo a disponibilidade de micronutrientes. Se a maior parte do sulfeto se ligar ao ferro, a disponibilidade dos demais metais aumenta. A tabela 5.2 contém valores de referência de cada um dos elementos.

Um método que fornece valores de referência e descreve a adição se encontra em processo de patenteamento [5-28].

Tabela 5.2: Valores de referência de micronutrientes

Elemento	Valores de referência [5-28]	Valores de referência [5-27]
	MS mg/kg	Concentração [mg/l]
Cobalto	0,4 - 10 (ideal 1,8)	0,06
Molibdênio	0,05 - 16 (ideal 4)	0,05
Níquel	4 - 30 (ideal 16)	0,006
Selênio	0,05 - 4 (ideal 0,5)	0,008
Tungstênio	0,1 - 30 (ideal 0,6)	
Zinco	30 - 400 (ideal 200)	
Manganês	100 - 1500 (ideal 300)	0,005-50
Cobre	10 - 80 (ideal 40)	
Ferro	750 - 5000 (ideal 2400)	1-10 [5-29]

Ao adicionar micronutrientes, ter em mente que se trata de metais pesados, que em altas concentrações podem ter efeito inibidor e são considerados substâncias nocivas. Em todo caso, a adição deve seguir o princípio de tanto quanto necessário e tão pouco quanto possível.

5.1.9 Nitrogênio, amônio, amônia

O nitrogênio contido na matéria orgânica é convertido em amônia (NH_3) durante a decomposição. A amônia, por sua vez, dissocia-se na água formando o amônio.

Por ser necessário no crescimento celular, o nitrogênio é um nutriente indispensável para a vida.

Por outro lado, há evidências de que elevadas concentrações de amônia/amônio no substrato inibem a metanogênese. Os mecanismos que acarretam a inibição ainda não são completamente entendidos. Aparentemente as bactérias têm a capacidade de se adaptar a elevadas concentrações. Assim, é difícil estabelecer limites claros, dada a especificidade com que cada processo reage à elevação da concentração de amônia/amônio.

Há fortes indícios de que o efeito inibidor advém da fração não dissociada, ou seja, da amônia, e que se firma uma dependência entre o efeito inibidor da concentração existente, da temperatura e do valor de pH. Disso resulta a consequência, comprovada na prática, de que usinas termofílicas são mais sensíveis a elevadas concentrações de amônio que usinas mesofílicas. A relação é representada pela seguinte equação.

A figura 5.1 representa o equilíbrio de dissociação e uma situação de inibição segundo [5-2]. É certo que os valores absolutos da inibição não podem ser aplica-

$$C_{\text{NH}_3} = C_{\text{NH}_4} \cdot \frac{10^{\text{pH}}}{e^{\frac{6344}{273+T}} + 10^{\text{pH}}}$$

Equação 5.3: Cálculo da concentração da amônia segundo [5-30] (C_{NH_3} concentração de amônia ($\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$), C_{NH_4} concentração de amônio ($\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$), T temperatura ($^{\circ}\text{C}$))

dos em todos os processos (ver a seguir), mas o princípio da progressão do efeito inibidor vale para qualquer processo.

A tabela 5.3 agrega valores de diferentes publicações sobre o tema da inibição por amônia/amônio. Ela evidencia a grande disparidade dos valores, o que reforça a tese de que não é possível chegar a posições absolutas quanto à inibição por amônia/amônio.

O estudo [5-21] conclui que o aumento das concentrações de amônio é acompanhado do aumento das concentrações de ácidos, correção que também pode ser observada na prática. A elevação das concentrações de ácidos é um indicativo de que a taxa de crescimento das populações acidofílicas se encontra próxima do seu auge. A operação estável é possível mesmo sob essas condições desfavoráveis, ainda que exija cuidado redobrado em caso de oscilações de carga, uma vez que o processo perde a sua capacidade de elevar a sua atividade metabólica para se adequar a maiores quantidades de substrato. Sob determinadas circunstâncias, a produção de gás permanece um tempo constante, mas os ácidos se acumulam no substrato em fermentação. Como as elevadas concentrações de amônio atuam como tampão, o aumento da concentração de ácidos orgânicos não necessariamente leva a alterações do valor do pH.

Se for permitido um longo período de adaptação (de até um ano), os microrganismos são capazes de se adaptar a altas concentrações de amônia. Estudos envolvendo reatores de leito fixo mostraram que estes têm melhor capacidade de se adaptar a elevadas concentrações que reatores agitados. Disso se depreende que a idade das bactérias tem um papel na adaptação; a conclusão é que longos tempos de retenção em reatores agitados seriam uma estratégia para combater o efeito inibitório.

Os limites entre a concentração de amônia, a carga orgânica volumétrica e o tempo de retenção ainda não são perfeitamente conhecidos. A adaptação exige tempo e a ela as variações da taxa de degradação são inerentes. Com isso, ao processo de adaptação está associado um risco econômico.



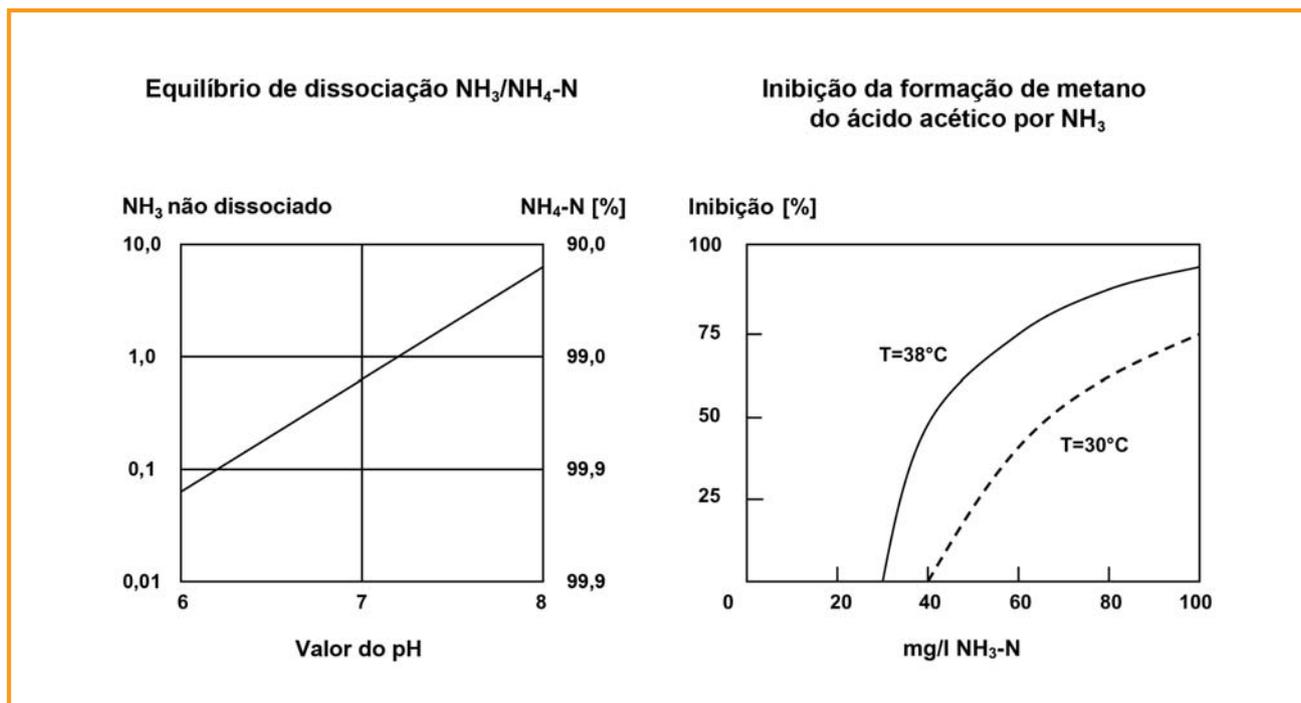


Figura 5.1: Inibição da metanogênese do ácido acético pelo NH₃ (segundo [5-2])

Tabela 5.3: Concentrações inibitórias de amônia citadas na literatura

Autor	Concentração	Observação
[5-33]	> 3000 mg · l ⁻¹ NH ₄	efeito inibitório
[5-32]	> 150 mg · l ⁻¹ NH ₃	efeito inibitório
[5-31]	500 mg · kg ⁻¹ NH ₃ 1200 mg · l ⁻¹ NH ₃	operação estável, concentrações elevadas de ácidos, efeito inibitório
[5-30]	< 200 mg · l ⁻¹ NH ₃	operação estável
[5-21]	Grau de degradação %	operação estável em todos os casos, mas capacidade de
	106 mg · l ⁻¹ NH ₃	71 degradação reduzida
	155 mg · l ⁻¹ NH ₃	62 e concentração de
	207 mg · l ⁻¹ NH ₃	61 ácidos elevada
	257 mg · l ⁻¹ NH ₃	56
[5-34]	> 700 mg · l ⁻¹ NH ₃	efeito inibitório

As concentrações de amônia/amônio podem ser medidas por meio de sondas sensíveis a íons, ensaio com cubeta ou pelo método tradicional via destilação e titulação (DIN 38406, E5). O uso de sondas não é disseminado, sendo a análise de amostras em laboratório a forma mais usual. Como os limites de concentração são específicos do processo, a concentração da amônia

é um parâmetro fraco para a avaliação do estado do processo. A determinação do teor de amônio deve ser acompanhada da medição do valor do pH a fim de permitir estimar o teor de amônia. Ele pode ser um bom auxílio para identificar a causa de possíveis distúrbios.

5.1.10 Sobrenadante

A formação de sobrenadante pode ser problemática em usinas com substrato fibroso. O sobrenadante se origina quando o material fibroso flutua e se entrelaça na superfície formando uma estrutura sólida. Se não for desestruturada por agitadores adequados, a espuma pode atingir uma espessura de vários metros, o que exige a retirada manual.

Espera-se, no entanto, certa estabilidade da superfície em usinas que promovem a dessulfurização pela introdução de ar no gasômetro. A superfície serve nesse caso como local de acumulação das bactérias dessulfuradoras.

O tratamento do sobrenadante se torna um problema de otimização, que normalmente é solucionado pelo operador pela verificação através da janela de inspeção. Até o momento, não existe uma técnica de medição que permita avaliar a formação de sobrenadante.

5.1.11 Formação de espuma

A espuma se origina pela reduzida tensão superficial provocada por substâncias atuando sobre a superfície do líquido. No processo de formação do biogás, ainda se desconhece a causa exata da formação de espuma. Ela ocorre em condições não ideais, tais como silagem deteriorada e sinais de sobrecarga em combinação com alta concentração de amônio. É possível que a causa resida em uma acumulação de compostos intermediários que modificam a tensão superficial ou de grupos de bactérias no processo, combinada com uma elevada formação de gás.

A espuma pode se tornar um problema grave se as tubulações de gás se entupirem e se a pressão no biodigestor pressionar a espuma para o exterior, p. ex. pelas válvulas de sobrepressão. Uma solução paliativa é o uso de antiespumantes. Para solucionar o problema de forma definitiva, deve-se identificar a causa e combatê-la.

No que toca à tecnologia de medição, a formação de espuma pode ser detectada pelo uso combinado de diferentes aparelhos medidores de nível. Um sensor de pressão, por exemplo, não reage à espuma, mas sensores ultrassônicos são capazes de detectar alterações na superfície. A diferença detectada por ambos os sistemas resulta na altura da espuma.

5.1.12 Avaliação do processo

O processo é avaliado pela análise e interpretação dos valores medidos. Como já mencionado, o cálculo do balanço dos fluxos de massa é o método mais seguro para descrever o sistema. Todavia, a aplicação prática desse método é inviável em função do seu custo elevado. Além disso, a obtenção dos valores medidos tem suas particularidades. Por isso, a seguir são apresentadas as diferenças entre a análise laboratorial e o uso de sensores instalados na linha do processo. Todas as análises de substrato em laboratório pressupõem a retirada de uma amostra representativa e o seu encaminhamento ao laboratório. Tais análises são onerosas, caras e não fornecem resultados imediatamente. Por outro lado, sensores acoplados diretamente ao sistema se caracterizam por uma densidade de medição bastante superior e os valores medidos são disponibilizados de imediato. O custo por medição é bem menor e os dados podem ser integrados facilmente na automação do processo.

Infelizmente, os parâmetros de medição necessários para o balanço da massa não podem ser obtidos por sensores na linha, exigindo análises laboratoriais

complementares. Os parâmetros e sua disponibilidade se encontram resumidos na tabela 5.4.

A monitoração contínua de todos os parâmetros listados é muito onerosa e em diversas usinas também desnecessária. Soluções parciais específicas têm de ser encontradas para atender às exigências de cada usina. Os critérios para o controle e a respectiva tecnologia de medição necessária são:

- desvio permitido do processo
- grau de automação almejado
- características do processo.

Tabela 5.4: Parâmetro de medição e disponibilidade

Parâmetros de medição para o balanço de massa	Disponível para a linha
Composição do substrato no carregamento	Determinação da MS em desenvolvimento, demais parâmetros por análise laboratorial
Compostos intermediários (ácidos orgânicos)	Análise laboratorial necessária
Quantidade de saída	Disponível para a linha
Composição Biofertilizante	Determinação da MS em desenvolvimento, demais parâmetros por análise laboratorial
Volume de gás formado	Disponível para a linha
Composição Biogás	Disponível para a linha

A detecção precoce de estados críticos do processo (acumulação de ácido seguida de inibição e redução da produção de gás) é a exigência mínima em qualquer sistema de monitoração e objetiva prevenir contra quedas graves no desempenho. Além disso, a monitoração deve ser suficientemente exata a ponto de permitir o controle da produção de gás e garantir que a usina de cogeração seja adequadamente abastecida.

O grau de automação depende das dimensões do equipamento. Quanto maior a usina, mais complexos se tornam os diversos subprocessos, o que exige a automação. Com o aumento do grau de automação, aumenta também a independência do pessoal técnico, possibilitando a monitoração à distância e a redução de erros humanos.

Usinas com grande carga orgânica volumétrica e/ou curtos períodos de retenção, que utilizam substâncias inibidoras em altas concentrações ou que alternam misturas de substratos, estão particularmente sujeitas a um elevado risco de sobrecarga do processo.



Esse risco deve ser compensado com os devidos investimentos em equipamentos de monitoração.

O capítulo 5.3 contém estimativas do custo de sistemas de monitoração.

5.2 Monitoramento e automação da usina

Existem diversas opções para controlar os processos e equipamentos, indo desde protocolos operacionais até sistemas de controle e registro de dados totalmente automatizados (figura 5.2). Os fatores a considerar antes de definir o grau de automação são a disponibilidade do controle de processo almejada, até que ponto a usina deve operar independentemente do pessoal e quais aspectos do processo devem ser obrigatoriamente automatizados.

À medida que aumenta o grau de automação, aumenta também a disponibilidade do controle do processo e, com ela, a disponibilidade da usina. Assim, sistemas altamente automatizados permitem o registro dos dados e a operação uniforme também em fins de semana e feriados. Quanto mais elevado o grau de automação, menos a operação da usina depende da presença do pessoal encarregado da operação. No que se refere às características do processo, quanto maior a usina, maior será o número de parâmetros de processo a monitorar. A partir de um determinado tamanho, a automação dos processos é indispensável. Em usinas com elevada carga orgânica volumétrica ou com propensão a apresentar sinais de deficiência (p. ex. de micronutrientes) ou substâncias inibidoras, o risco de distúrbios graves é elevado. Nesses casos, o registro automático de dados e o controle de processos permitem detectar e corrigir os distúrbios a tempo.

Usinas menores alimentadas por esterco ainda utilizam soluções simples, como a documentação dos dados em protocolos operacionais e o controle manual ou temporizado dos subprocessos. Se no entanto os dados não forem inseridos posteriormente em um sistema de computador, não é possível realizar a análise e documentação completa dos dados e a otimização dos processos é dificultada.

Conforme os requisitos da aplicação, estão à disposição diferentes soluções de automação. O termo "automação" abrange as operações de controle, controle realimentado e visualização. A automação pressupõe que os processos sejam monitorados, ou seja, que os dados do processo sejam continuamente medidos e gravados.

Para o controle de processos em usinas de biogás, geralmente são usados controladores lógicos programáveis (CLP). Os CLPs assumem diversas tarefas da automação intimamente ligadas ao processo. Em usinas de biogás, essas tarefas incluem o controle de processos unicamente técnicos, tais como a monitoração da temporização das bombas, intervalos de alimentação, períodos de agitação, mas também dos processos biológicos. Além disso, o CLP deve garantir a medição de todos os parâmetros necessários (p. ex. estados de ligação de motores, potência de entrada, rotações, parâmetros de processos como o pH, temperaturas, taxas de produção de gás, sua composição, etc.), bem como acionar atuadores como válvulas, agitadores e motores de bombas. Para registrar os parâmetros medidos, os valores obtidos nos sensores são convertidos em sinais padrão interpretáveis pelo CLP.

A comutação de atuadores se dá por relés, embora o controle possa ser simplesmente temporizado ou definido como reação a parâmetros de medição de entrada. Também é possível combinar essas opções de controle. Em todos os tipos de CLP, são implementados o PID padrão (Proportional Integral Differential) e em certos casos controladores de lógica fuzzy simples, embora outros algoritmos de controle também possam ser programados manualmente.

Um CLP se compõe do módulo central (CPU: Central Processing Unit), cujo núcleo é constituído por um microcontrolador. Conforme a categoria do CLP, a capacidade desses controladores é muito variável. As principais diferenças são na velocidade de processamento e na redundância de funções. O espectro vai de CPUs relativamente pequenas e baratas até sistemas de elevada disponibilidade, redundantes e dotados de controladores potentes.

A escolha do CLP deve levar em conta restrições de tempo real. Entende-se por sistema de automação em tempo real aquele com capacidade de reagir dentro do tempo previsto em um processo. Cumprido esse requisito, o sistema é qualificado como em tempo real. Como o processo de geração de biogás não tem elevada exigência quanto ao funcionamento em tempo real, em usinas de biogás são adotados preferencialmente os CLPs de preço médio a baixo.

Além da CPU, os fabricantes oferecem um grande número de módulos para serem a ela conectados. Entre esses opcionais, destacam-se os módulos analógicos e digitais para a entrada de emissores de sinal e sondas de medição, e para a saída para diversos atuadores e instrumentos de indicação. O ramo do biogás pode tirar proveito de conexões especiais para aparelhos de medição que utilizam a porta RS-232.

No mercado também estão disponíveis diversos tipos de controladores para a comunicação com o bus.

5.2.1 Sistema de bus

Os últimos anos testemunharam uma crescente descentralização da automação, graças a tecnologias de comunicação de alto desempenho. Os sistemas de bus são atualmente indispensáveis para o controle descentralizado de equipamentos e permitem a comunicação entre diferentes participantes. Por meio de sistemas de bus, é possível conectar todos os componentes da usina entre si.

A exemplo dos CLPs, também existem diversos tipos de bus. O processo em si, as exigências quanto à operação em tempo real e as características do meio (p.ex. atmosfera potencialmente explosiva) são fatores a considerar na escolha do tipo de comunicação do bus. O PROFIBUS-DP é um padrão estabelecido e utilizado em muitas usinas de biogás. Ele permite a conexão entre pontos separados por vários quilômetros. Diversos equipamentos são compatíveis com esse padrão de comunicação de bus, sendo que suas formas aperfeiçoadas PROFINET e ETHERNET também são muito utilizadas.

5.2.2 Planejamento da configuração

O CLP também dispõe de um programa, que forma a base dos controles de processo em atividade. Esse programa é desenvolvido e personalizado durante a fase de configuração por meio de um ambiente de programação, o software de configuração. Conforme os objetivos do CLP, esse programa pode conter simples tarefas de controle até complexos mecanismos de regulação. Para permitir a intervenção manual, é possível configurar opções de operação automática e manual.

Caso ocorram estados operacionais não previstos pelo programa do controle, deve haver a possibilidade de operação manual. Um estado extremo do processo ou avaria pode ser a parada de uma bomba, por exemplo. O sistema também deve prever o desligamento automático para o caso de grandes avarias ou acidentes. Nessa situação, a usina inteira ou o componente afetado é colocado em um estado de operação seguro pelo acionamento de determinados sensores ou por um botão de desligamento de emergência. Da mesma forma, medidas preventivas devem ser tomadas contra a interrupção da alimentação de tensão

do sistema de controle. Como medida preventiva, os fabricantes dos CLPs oferecem fontes de alimentação ininterrupta (no-break) para o abastecimento contínuo de energia. Elas permitem o desligamento controlado do CLP no tempo adicional em que o equipamento fica ligado. Isso assegura que a usina não entre em um estado indefinido.

5.2.3 Aplicações/visualização

Outro importante componente das soluções de automação são os PCs e as opções em painéis com função de visualização. Eles são conectados entre si por um sistema bus e juntos constituem a solução de automação. Em quase todas as usinas se utiliza a função de visualização, que constitui o atual estado da técnica. São comuns os painéis oferecidos em diversos modelos e apropriados para a representação de uma pequena parte de uma usina.

É possível, p. ex., o uso de um painel para a visualização da bomba de transporte do substrato. Em modo automático, ele permite a exibição no local de todos os dados importantes, tais como a rotação e a temperatura do motor, quantidade bombeada, falhas, etc. Após ser comutada para o modo manual, a bomba pode ser controlada manualmente. A tecnologia de painéis evoluiu tanto que hoje em dia permite complexas visualizações e tarefas de controle.

A solução "clássica" é a visualização baseada em PC. Ela permite representar desde subprocessos específicos até complexas centrais de controle. Uma central de controle é um equipamento em que chegam todas as informações e que permite a intervenção humana nos processos e na usina.

A fim de possibilitar o acesso aos dados do CLP pelos aplicativos no sistema operacional Windows, foi implementado um padrão que permite essa comunicação. O servidor OPC é uma plataforma de comunicação padronizada com a qual é possível estabelecer a comunicação entre componentes de diversos fabricantes. Por meio desse servidor, é possível criar uma rede flexível abrangendo os diferentes sistemas de controle e regulação, bem como outros aplicativos, sem que os participantes necessitem de informações exatas das interfaces de seus parceiros. O aplicativo também não exige informações sobre a rede de comunicação do sistema de controle. Isso viabiliza aplicativos de ampla compatibilidade, tais como programas para o registro de dados ou para realizar uma visualização especial personalizada.



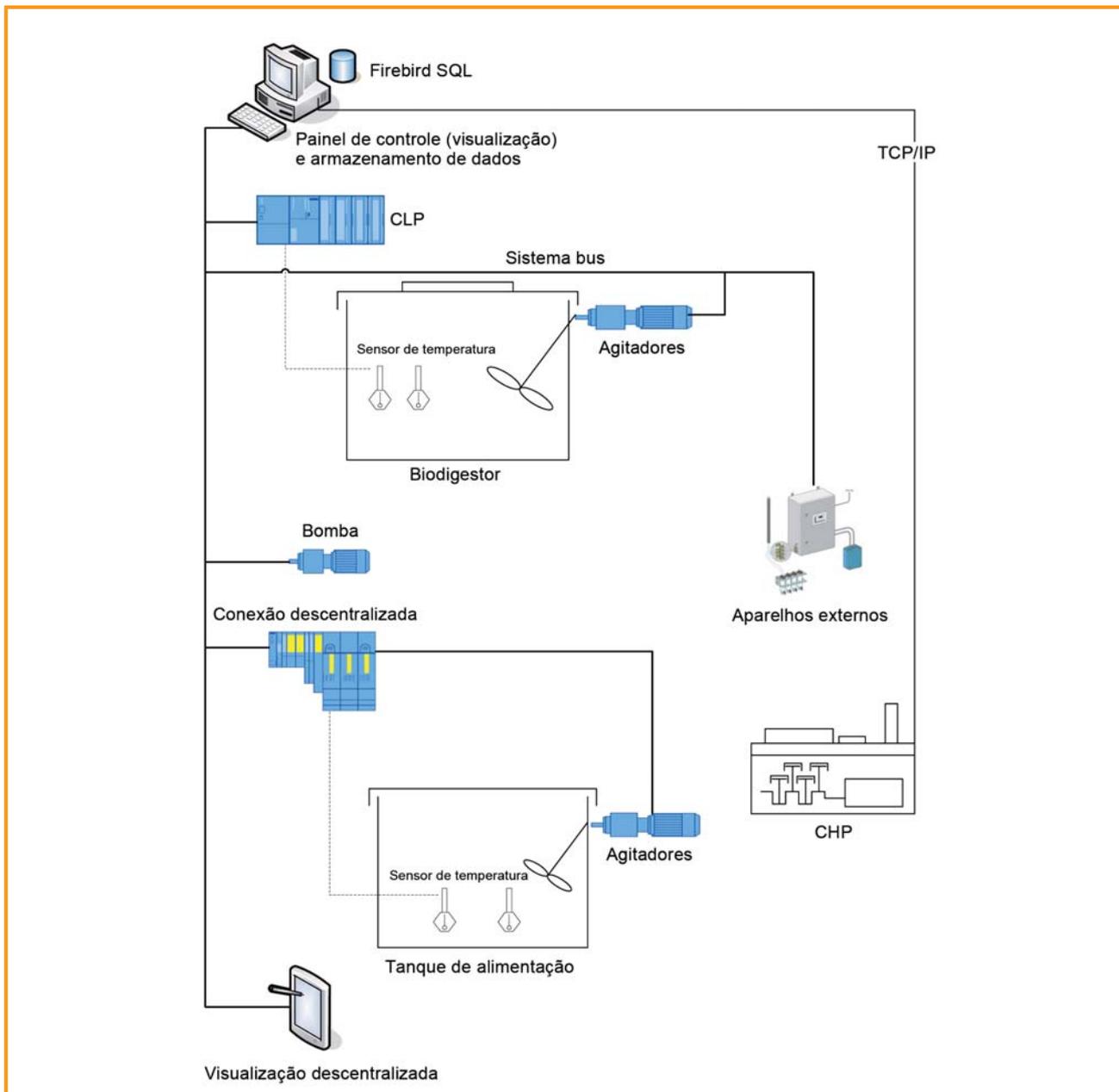


Figura 5.2: Esquema de monitoramento da usina

5.2.4 Registro de dados

O registro de dados em larga escala é realizado em bancos de dados. Embora os fabricantes de CLPs ofereçam seus próprios sistemas de registro de dados, recomenda-se o uso de soluções independentes de compatibilidade ampla, pois elas permitem maior flexibilidade nas opções de acesso.

É possível selecionar os dados e armazená-los a partir das inúmeras informações registradas. Com isso, é possível analisar o desempenho da usina em períodos mais longos. Também é possível gravar eventos como mensagens de falhas.

Não é preciso discorrer detalhadamente sobre o monitoramento e a regulação de processos essencialmente técnicos como o nível de enchimento, os períodos de bombeamento, etc., uma vez que a coordenação e controle desses processos se dá conforme o estado da técnica e geralmente não apresentam dificuldade.

5.2.5 Controle de processo retroalimentado

O controle de processo retroalimentado garante que as metas do processo sejam atingidas. Por meio da análise dos dados medidos, o controlador determina o

Tabela 5.5: Métodos para realizar o controle

Métodos de controle	Aplicação	Observações
Controle PID (Proportional Integral Differential)	Quando há poucos dados disponíveis, não existe nenhum modelo e pouco se sabe sobre o comportamento da planta.	Oferece bons resultados; restrito a estratégias simples de entrada/saída e comportamento linear.
Modelos físicos, orientados a processos.	Exige conhecimento dos fatores internos do processo.	Exige a definição exata dos parâmetros, o que requer a medição de dados; apropriado para comportamento não linear.
Redes neurais	Quando não houver modelo de simulação e nenhum conhecimento do processo for necessário; exige grandes volumes de dados.	Ótimos resultados; demanda cautela com o tipo de aprendizagem, o controlador é uma caixa preta.
Lógica fuzzy	Exige pouca quantidade de dados; requer conhecimento especializado se não houver modelo de simulação.	Pode ser utilizado quando o processo for não linear e em cenários de entrada e saída; pode integrar conhecimento especializado; manuseio fácil.

desvio em relação ao estado desejado e inicia as medições necessárias para que se retorne a tal estado.

Ao contrário do controle simples, o retroalimentado considera a reação do processo na operação de controle. Controles simples não são adequados para o processo de digestão, pois o mecanismo de controle não tem a capacidade de registrar perturbações não previstas no processo e reagir adequadamente. Todo tipo de controle de processo, mesmo aqueles realizados pelo operador, exige valores medidos que permitam a descrição do estado do processo com suficiente precisão. Caso contrário, os distúrbios no processo não podem ser detectados a tempo, havendo o risco de perdas graves no desempenho.

Em usinas de biogás, o controle de processo retroalimentado se dá pelo processo biológico e na maior parte dos casos é realizado pelo operador da usina. Por meio da comparação dos valores medidos disponíveis com os valores empíricos e valores nominais, o operador estima o estado atual do processo. A eficácia desse método depende muito da disponibilidade e do conhecimento técnico do pessoal.

Se for implementado um monitoramento e controle automatizado dos processos, são maiores as exigências quanto ao registro e análise dos valores medidos, pois o operador da usina não mais se encontra à disposição para a tomada de decisões, estando apenas disponíveis eletronicamente as informações de processo que podem ser utilizadas no controle.

Na área da biologia, o controle automático ainda não atingiu o estado da técnica em aplicações de larga escala. No entanto, em vista do crescente grau de industrialização das usinas e grau de eficiência almejado cada vez maior, tais sistemas serão de uso mais disseminado no futuro. Algumas das opções são apresentadas a seguir. As explicações não se aprofundam

em detalhes, os quais podem ser encontrados na respectiva literatura técnica.

5.2.5.1 Métodos padrão para o controle retroalimentado

Diversos métodos já comprovaram a sua utilidade no controle retroalimentado do processo de decomposição anaeróbia. As dificuldades no controle de processo retroalimentado são o caráter não linear do processo e a complexidade dos processos envolvidos.

Controle PID

O controle PID (proporcional integral diferencial) é o algoritmo mais popular em aplicações industriais com controle retroalimentado e combina três mecanismos de controle. O elemento proporcional representa o fator que determina a amplitude de variação da variável manipulada, que é alterada proporcionalmente ao desvio do processo em relação ao estado desejado. Para isso, é utilizada a constante de proporcionalidade. Esse controle pode ser ampliado em um componente integral. Esse componente é necessário quando, devido a uma variação persistente no sistema, o desvio ocasionado não pode ser compensado pela constante de proporcionalidade. Esse problema foi resolvido com o auxílio de um elemento proporcional à integral do desvio. O elemento diferencial é proporcional ao aumento do desvio e permite uma rápida reação a desvios acentuados.

O controle PID se caracteriza por um comportamento linear e não dinâmico. Não é possível mapear correlações entre os diferentes parâmetros de medição.

O PID é um controle de uso muito disseminado que pode ser utilizado também em muitas aplicações

$$u = u_0 + k_p e + k_i \int edt + k_d \frac{de}{dt}$$

Equação 5.4: Controle PID (e saída do controle, u_0 saída básica do controle, e desvio do processo, k_p constante de proporcionalidade, k_i fator do elemento integral, k_d fator do elemento diferencial)

em usinas de biogás. Ele pode, por exemplo, ser utilizado para ajustar o teor de oxigênio necessário no biogás para a dessulfurização ou para o controle da temperatura no biodigestor. Sob determinadas circunstâncias, esse simples algoritmo também pode ser utilizado para o controle do processo de geração de biogás [5-35], [5-37].

A princípio, pode-se realizar o controle com todos os métodos citados, o que foi comprovado em ensaios em escala laboratorial. No entanto, controles desenvolvidos com base em modelos físicos e orientados a processos, em sistemas baseados em conhecimento ou redes neurais, foram até o momento pouco utilizados em operações de maior escala.

5.2.5.2 Outras abordagens

Muitos construtores de usinas oferecem também consultoria e pacotes analíticos com o objetivo de proporcionar a otimização do processo biológico. Esses serviços são oferecidos também por empresas independentes na forma de pacotes de consultoria e auxílio imediato. Também é oferecida como opção a análise direta do processo com base na sua dinâmica ("comunicação com o processo"). Nesse caso, o desempenho do processo é avaliado com base na sua resposta dinâmica a um "distúrbio".

Na Internet há diversos fóruns em que os operadores trocam ideias sobre as dificuldades e os desafios. Além disso, algumas organizações oferecem cursos de treinamento para administradores e pessoal operador.

5.3 Controle do processo na partida e operação regular

5.3.1 Operação regular

A seguir, são descritos os parâmetros de processo a serem levantados para que se avalie a biologia do processo. Serão distintos dois diferentes cenários de usi-

nas, uma vez que o ônus associado depende do tipo e do modo de operação da usina. Não importa se a coleta de dados ocorre na linha ou manualmente. O importante é que os dados sejam preparados para uma análise adequada.

Cenário 1: usina normal alimentada por esterco líquido, baixa carga orgânica volumétrica (menos de 2 kg MOS/m³ · d), sem substâncias inibidoras, concentrações de ácidos em operação normal inferiores a 2 g/l.

Cenário 2: usinas com elevada carga orgânica volumétrica, composição e qualidade do substrato variáveis e possivelmente substâncias inibidoras (p. ex. amônio com teor maior que 3 g/l), concentrações de ácido no modo de operação normal superiores a 2 g/l e na troca do regime de carregamento.

Usinas com distúrbios, ou seja, com parâmetros de processo variáveis, devem ser testadas no mínimo com a densidade de medição indicada no cenário 2. Estados dinâmicos de processo sempre têm o risco latente de que o processo saia da faixa em que a autoestabilização é possível. Portanto, as trocas de regime operacional, de substrato, o aumento da quantidade de carga e quejandos devem sempre ser acompanhados de uma densidade de medição maior.

Se for conhecido que a operação do processo está sujeita a substâncias potencialmente inibidoras (p. ex. amônia), convém também monitorá-las. Isso permite identificar mais rapidamente a causa de um distúrbio.

Se o balanço do processo resultar na redução da capacidade de degradação, procede-se à etapa seguinte da análise de causas. As causas de distúrbios e sua solução são tratadas no capítulo 5.4.1. A coleta ou o preparo dos dados devem ser na forma eletrônica para permitir o acompanhamento de tendências e correlações de longo prazo.

Na maior parte das usinas, a avaliação do processo se baseia na experiência do operador da usina. Essa avaliação pode ser realizada com mais precisão e objetividade por um monitor de processos, que analisa os dados com base em modelos matemáticos que descrevem o processo. A avaliação da evolução do processo sem um modelo matemático fica impossibilitada principalmente no caso de alterações dinâmicas, tais como trocas de substrato ou modificações da quantidade de carga. O mesmo vale para prognósticos do comportamento do processo para a definição das quantidades de carga futuras.

Visando à avaliação, somente sistemas de controle baseados em modelos são capazes de fornecer prognósticos quanto à evolução do processo. Se os valores medidos não forem integrados em um modelo, no

Tabela 5.6: Programa de medição para usinas de biogás para a monitoração do processo biológico (modo de operação normal)

Variáveis para a avaliação do processo	Unidade	Cenário de usina 1	Cenário de usina 2
Quantidade carregada	m ³	diária	diária
Composição do substrato no carregamento	kg MS/m ³ ; kg MOS/m ³	mensal	semanal
Temperatura	°C	diária	diária
Compostos intermediários (ácidos orgânicos)	g/l	mensal	semanal
Quantidade de saída	m ³	diária	diária
Composição dos biofertilizantes	kg MS/m ³ ; kg MOS/m ³	mensal	semanal
Volume de gás formado	m ³	diária	diária
Composição do biogás	% em vol. metano, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, opcionalmente oxigênio	diária	diária
Valor do pH	-lg H ₃ O ⁺	mensal	semanal
Medições complementares			
Concentração de amônio, teor total de nitrogênio	g/l g/kg	mensal	semanal
Micronutrientes	g/l	conforme a necessidade	conforme a necessidade
Produção de gás específica	l/kg MOS	mensal	semanal
Carga orgânica volumétrica	kg MOS/m ³ · d	mensal	semanal
Tempo de retenção	d	mensal	semanal
Taxa de produção de gás específica	m ³ /m ³ · d	mensal	semanal

melhor dos casos fornecem um retrato instantâneo da situação, não sendo adequados para o controle dinâmico.

Como regra geral na operação de uma usina, se a alteração do regime de alimentação for inevitável, ela só deve ser feita se seus efeitos puderem ser compreendidos. Ou seja, apenas um parâmetro deve ser modificado e os demais mantidos constantes. Caso contrário, os efeitos não podem mais ser associados às causas, impossibilitando a otimização do processo.

Para a operação normal, deve-se evitar a realização de digestão simples, sendo preferíveis composições de substrato variadas, mas constantes ao longo do tempo. Visando à otimização, pode-se modificar as frações da mistura até que se atinja a relação ideal entre a carga orgânica volumétrica e o tempo de retenção.

O processo biológico atinge seu pico de eficácia sob condições constantes. O ajuste de quantidades de alimentação constantes e a composição do substrato com elevada precisão é portanto um importante passo rumo à otimização do processo.

5.3.2 Processo de partida

O processo de partida se distingue da operação normal no sentido de que o estado estacionário nunca é atingido. Os processos em atividade sofrem uma constante variação dos parâmetros. Para executar o processo nesse estado em sua carga máxima, é necessária uma densidade de medição superior à da operação normal, dada a instabilidade do processo, que o torna muito mais suscetível a paradas.

Na partida, o biodigestor deve ser enchido no menor tempo possível, até que todas as saídas e entradas (vedações de líquidos) estejam cobertas de líquido. Durante a partida, é preciso ter em mente que no gasômetro do biodigestor pode ocorrer a formação de misturas gasosas explosivas. Por isso, o enchimento deve ocorrer rapidamente. Se não houver inóculo disponível em quantidade suficiente para a partida, dissolver o inóculo com água para manter baixo o volume do gasômetro. Os agitadores devem ser operados submersos durante a partida, evitando assim a ocorrência de faíscas.

Após o enchimento, o conteúdo do reservatório pode ser aquecido uniformemente. Em seguida, pode ser iniciado o carregamento do substrato.

Na primeira entrada em operação, a fase de partida pode ser acelerada pela adição de uma quantidade suficiente de bactérias envolvidas no processo de digestão. Quanto maior a adição de inóculo, mais curta é a fase de início. O ideal é que o biodigestor seja enchido completamente com biomassa fermentada proveniente de outra usina. Quando disponível, utilizar também uma mistura de biomassa fermentada de diferentes usinas, esterco e água. Ao adicionar a água, ter em mente que a capacidade de tamponamento do sistema decresce com o aumento da diluição. O acréscimo da carga executado rápido demais pode ocasionar instabilidades do processo, aumentando o risco de parada do biodigestor.

O uso de esterco líquido de forma geral tem efeito positivo sobre o processo de partida. Isso se explica normalmente pela abundância de micronutrientes e pelo grande número de populações de bactérias diferentes. Principalmente o esterco líquido bovino contém arqueas metanogênicas em quantidade suficiente a ponto de o processo rapidamente se estabilizar por si próprio. Embora a princípio o esterco líquido suíno também possa ser utilizado, esse substrato não tem um conteúdo muito elevado de microrganismos metanogênicos.

Após a estabilização da temperatura, aguardar até que o pH se estabilize na faixa neutra, o teor de metano no gás formado ultrapasse 50% e a concentração de ácidos graxos de cadeia curta fique constante abaixo de 2.000 mg/l. A seguir, pode ser iniciado o carregamento. O carregamento deve ser crescente, sucessivo e em etapas, até que a carga máxima seja atingida. Após cada acréscimo, aguardar até que a taxa de produção de gás, o teor de metano, a relação AOV/TAC (ou a concentração de ácidos), e o valor do pH se estabilizem, para então proceder ao acréscimo seguinte da carga orgânica volumétrica. Embora a relação AOV/TAC seja um indicador com restrições, na fase de partida se presta muito bem como parâmetro de controle para a avaliação da estabilidade do processo, uma vez que é possível medi-la com alto grau de detalhamento de forma simples e barata. Para obter conclusões mais confiáveis sobre a estabilidade do processo, o espectro de ácidos pode ser obtido ocasionalmente e de forma complementar, permitindo identificar os tipos de ácidos presentes.

Normalmente, após um acréscimo de carga registra-se uma breve elevação da relação AOV/TAC. Em alguns casos, a produção de gás até decresce ligeira-

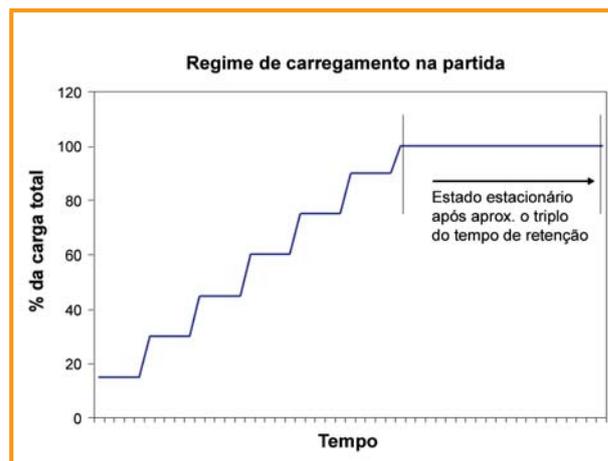


Figura 5.3: Regime de carregamento na partida

mente. Esse efeito pode se manifestar mais ou menos acentuadamente, conforme a magnitude do acréscimo de carga. Com a alimentação constante, a relação AOV/TAC deve se estabilizar e a produção de gás pender para um nível compatível com o volume de entrada. Só depois é que deve continuar o acréscimo na carga. Se a alimentação for constante e a relação AOV/TAC aumentar, mas a produção de gás diminuir, isso indica que ocorreu um distúrbio no processo. Nesse caso, deve-se interromper o acréscimo de carga. Conforme a situação e a relação AOV/TAC, a quantidade de entrada deve até mesmo ser reduzida.

Em resumo, conclui-se que os seguintes aspectos têm efeito positivo sobre a operação de partida:

- uso de esterco líquido bovino fresco ou lodo ativo como inóculo proveniente de usinas de biogás em bom funcionamento
- programa de medição dos parâmetros biológicos denso e bem ajustado (ver tabela 5.6)
- uniformidade na alimentação e qualidade do substrato
- operação da usina sem distúrbios.

Ao ser atingida a carga plena, o estado estacionário ainda não foi alcançado. O sistema entra nesse estado após cerca de três vezes o tempo de retenção.

Elevadas concentrações de amônia exigem a tomada de medidas especiais. Nessa situação, o processo precisa de longas fases de adaptação que podem durar de vários meses até um ano. Isso tem um papel importante no planejamento e no financiamento do projeto. Nesse caso, recomenda-se também o uso de biomassa fermentada de uma usina que utiliza substratos semelhantes. Uma das estratégias é aumentar a concentração do amônio até a concentração final tão rápido quanto possível, permitindo que as bactérias já comecem a se adaptar ao estado final. Caso contrário,

cada aumento exigiria uma nova fase de adaptação. A concentração final pode ser atingida rapidamente se desde o princípio o biodigestor for alimentado com a mistura de substrato a ser utilizada também no estado final.

Em usinas que processam exclusivamente biomassas dedicadas e cuja partida é realizada com esterco líquido, os sinais de deficiência de micronutrientes ocorrem somente após 6 a 12 meses. Por essa razão, nessas usinas o processo deve ser acompanhado cuidadosamente, mesmo que a partida seja bem-sucedida.

Biodigestor 1	Mistura de biofertilizantes de duas usinas (20% cada), esterco líquido bovino (10%), água (50%), teor de matéria seca de cerca de 1,5% da MF; enchimento e estabilização da temperatura em cerca de 25 dias
Biodigestor 2	Mistura de biofertilizantes de 3 diferentes usinas (aprox. 44%), esterco líquido bovino (6%), biofertilizantes do biodigestor 1 (50%)
Biodigestor 3	Enchimento completo com biofertilizantes dos biodigestores 1 e 2

Em todo caso, no primeiro ano de operação deve-se empreender um maior esforço na monitoração do processo.

Em usinas de digestão de sólidos operando com a técnica de garagem e abastecidas por plantas energéticas ou material proveniente das atividades de conservação da paisagem, recomenda-se dar a partida com material completamente fermentado de usinas já em

funcionamento. O esterco líquido não é apropriado para a partida de uma fermentação a seco, uma vez que o material flutuante pode levar ao entupimento dos bicos de percolação do biodigestor de baía. Em vez disso, deve-se iniciar com água pura como líquido de percolação e com o digestor de baía cheio, preferencialmente com material completamente fermentado.

A seguir, o processo é ilustrado com a operação de partida de uma usina de biogás com três digestores, cada um com um volume de trabalho de 4.000 m³. São explicadas diferentes estratégias de partida até que se atinja a operação regular.

Biodigestor 1: Após atingir a temperatura operacional de 37 °C, foi iniciada a primeira dosagem de sólidos. O substrato foi composto apenas de silagem de milho.

Na estratégia de partida escolhida nesse exemplo, primeiro realizou-se uma adição em lotes de quantidades relativamente grandes de substrato, com tempos de espera entre as dosagens definidos conforme o nível da produção de gás. Desde o início, foram selecionadas cargas orgânicas volumétricas relativamente altas e o tempo entre as entradas de substrato foram diminuídos gradativamente. A vantagem dessa estratégia de partida é que a operação em carga total normalmente pode ser atingida mais rápido que com aumento contínuo em pequenos passos. O aumento seguinte da carga se orientou pela evolução da relação AOV/TAC e pela observação da variação das concentrações de ácidos graxos, bem como pela produção de gás do biodigestor.

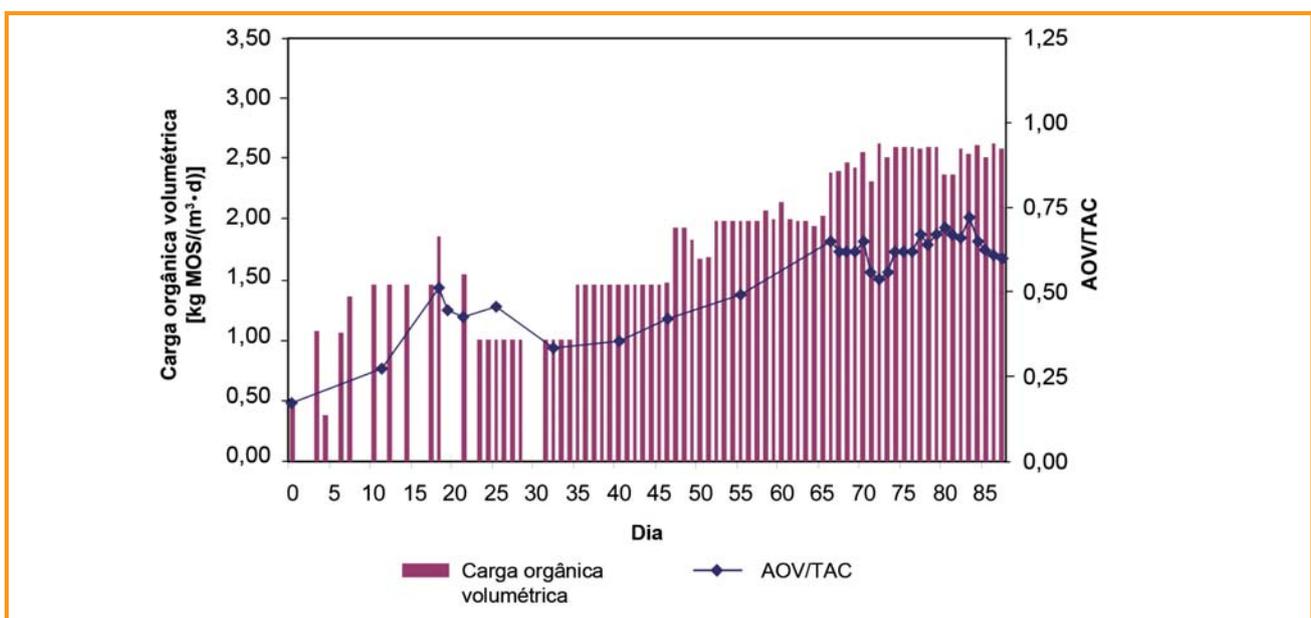


Figura 5.4: Curso da fase de partida biodigestor 1

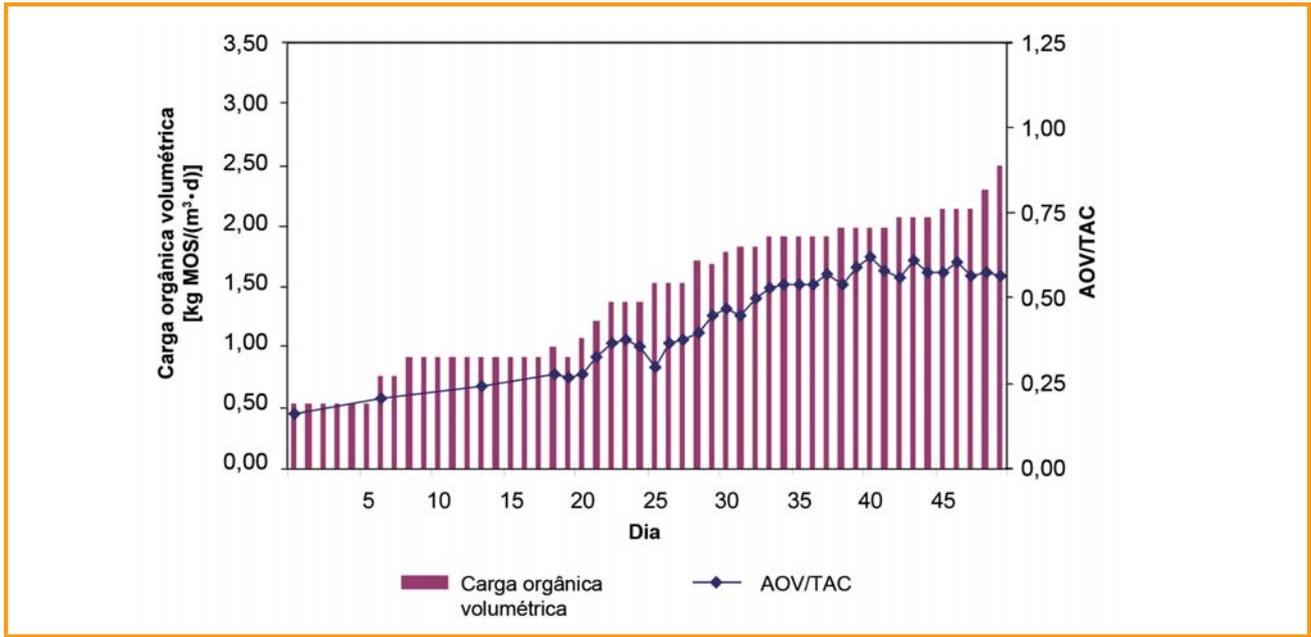


Figura 5.5: Curso da fase de partida biodigestor 2

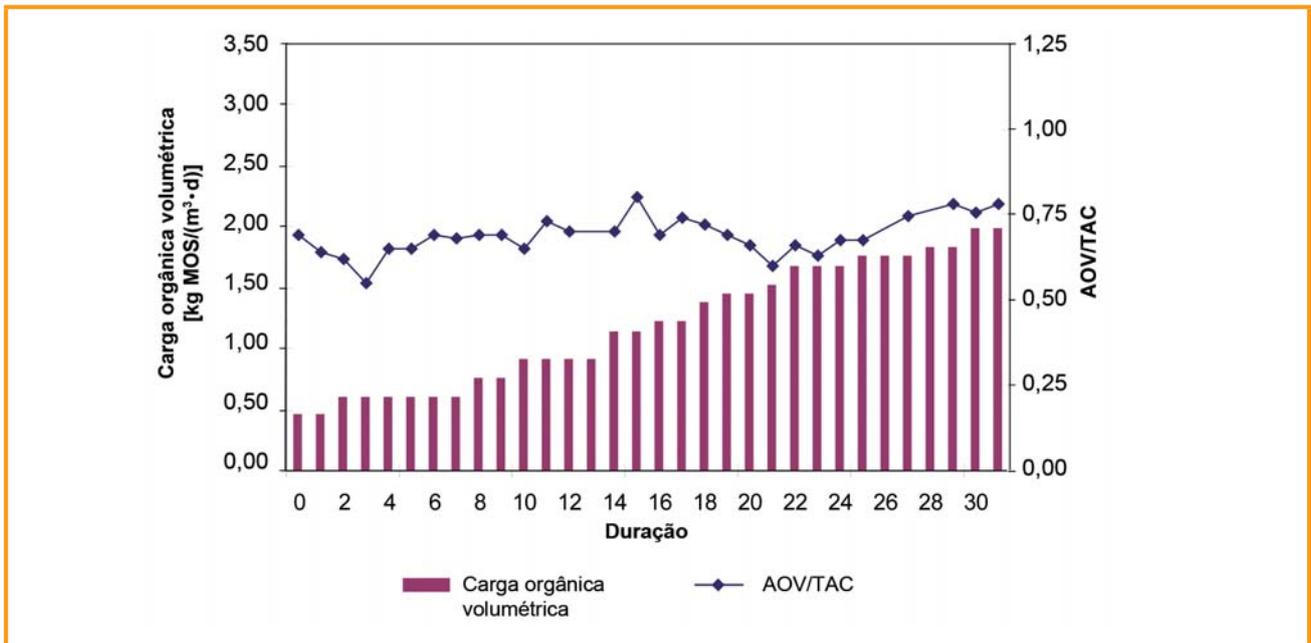


Figura 5.6: Curso da fase de partida biodigestor 3

O gráfico da figura 5.4 mostra a carga orgânica volumétrica e a relação AOV/TAC durante a partida do biodigestor 1. Ele evidencia que os carregamentos em choques causaram graves distúrbios no processo. Já após o primeiro choque de carregamento, relativamente baixo, é possível identificar a duplicação da relação AOV/TAC. A razão das fortes variações é o elevado teor de umidade do sistema e a baixa capacidade de tamponamento associada, que evidencia o fato de o

valor do pH ser muito sensível à adição de substrato, reagindo rapidamente. Normalmente, o pH é um parâmetro que se altera lentamente e, na prática, alterações nesse parâmetro são pouco notáveis. Em virtude da ocorrência de instabilidades, a partir do 32º dia de operação foi adotada a estratégia de partida com adição de substrato contínua. Por meio do aumento lento e contínuo da quantidade introduzida, foi possível atingir no 110º dia de operação uma carga orgânica vo-

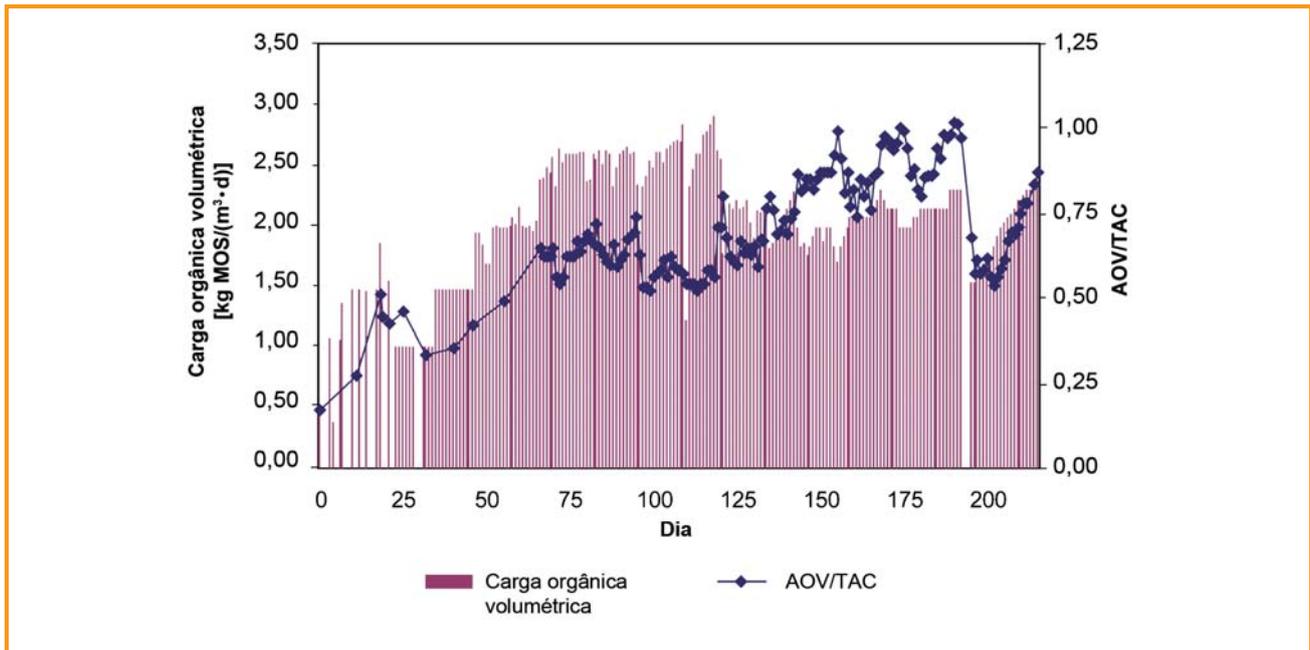


Figura 5.7: Curso da fase de partida biodigestor 1 sob deficiência de micronutrientes

lumétrica média de 2,6 kg MOS/(m³ · d). A estratégia de partida do carregamento em choque pode propiciar que se atinja mais rapidamente a carga total, desde que sob as condições adequadas como elevada atividade do lodo inóculo e controle do processo intensivo. No exemplo mostrado, essa estratégia não se mostrou adequada em função da baixa capacidade de tamponamento resultante do alto teor de umidade.

O enchimento do biodigestor 2 ocorreu paralelamente à operação de partida do primeiro biodigestor.

O gráfico da figura 5.5 exhibe a operação de partida do biodigestor 2. Até o 50º dia de operação, a carga orgânica volumétrica foi elevada para aprox. 2,1 kg MOS/(m³ · d), com a tendência de elevação da relação AOV/TAC. Apesar do aumento da relação AOV/TAC, foi possível fazer o biodigestor atingir a sua carga total rápida e controladamente.

O gráfico da figura 5.6 exhibe a operação de partida do biodigestor 3. Nesse caso, em 30 dias foi possível aumentar a carga orgânica volumétrica para 2,1 kg MOS/(m³ · d) mantendo a relação AOV/TAC constante. O primeiro enchimento com biofertilizantes permite um rápido aumento até a carga total. A relação AOV/TAC já estava elevada no biofertilizante.

As diferenças no primeiro enchimento mostram efeitos evidentes na estabilidade do processo e na velocidade do aumento até a carga total. É patente que quanto maior a fração de biofertilizantes e quanto melhor os microrganismos se adaptarem às características do substrato, mais rapidez e estabilidade são possíveis na partida do biodigestor.

A seguir, é apresentada a evolução típica de uma partida com inibição em função de carência de micronutrientes. Após a partida bem-sucedida, a usina operou com estabilidade entre o 60º e o 120º dia. À medida que a operação prossegue, porém, o inóculo (biofertilizantes e esterco) é lixiviado e as concentrações se estabilizam em função do substrato (silagem de milho). Nesse caso, o substrato não contém um teor suficiente de micronutrientes, o que leva à deficiência e, por conseguinte, à inibição na formação de metano. Como consequência dessa inibição, os ácidos formados não podem mais ser degradados e após 120 dias de funcionamento estável a relação AOV/TAC aumenta, mesmo após a posterior redução da carga orgânica volumétrica (ver figura 5.7). As causas e possíveis medidas corretivas são explicadas em detalhe no capítulo 5.4.2. A parada do biodigestor é inevitável se nessa fase não ocorrer uma intervenção. É importante lembrar que, em função do inóculo, esse distúrbio do processo é peculiar por se fazer notar só após alguns meses de operação.

5.4 Gestão de distúrbios

5.4.1 Causas dos distúrbios do processo

Fala-se em distúrbio do processo quando a decomposição anaeróbia no biodigestor é influenciada negativamente e ocorre com intensidade abaixo da ideal. Com isso, a degradação dos substratos é insuficiente.

Independentemente de sua magnitude, os distúrbios do processo sempre têm um impacto negativo sobre a economia de uma usina de biogás. Por isso, os distúrbios devem ser rapidamente identificados e eliminados.

Os distúrbios ocorrem quando as condições do meio em que as bactérias ou grupos de bactérias se reproduzem não são ideais. Os sintomas do distúrbio se manifestam mais ou menos rapidamente, conforme a sua intensidade e em que período as condições do meio se alteraram para pior. Na maior parte dos casos, os distúrbios se fazem sentir por um aumento constante da concentração de ácidos graxos. Esse sintoma se manifesta qualquer que seja a causa, o que se explica pelo fato de as bactérias acetogênicas e metanogênicas serem mais sensíveis a variações no meio que outros grupos de bactérias. Se não houver intervenção, a evolução do distúrbio do processo ocorre da seguinte forma:

- Aumento da concentração de ácidos graxos: primeiro ácidos acético e propiônico, persistindo a carga do processo, também ácidos isobutírico e isovalérico
- aumento contínuo da relação AOV/TAC (paralelamente ao aumento dos ácidos graxos)
- redução do teor de metano
- redução da produção de gás em alimentação constante
- queda do valor do pH, acidificação do processo
- colapso total da produção de gás.

A seguir, são descritas as possíveis causas dos distúrbios de processo, tais como sinais de deficiência (micronutrientes), variações de temperatura, substâncias inibidoras (amônia, desinfetantes, sulfeto de hidrogênio), erro no carregamento e sobrecarga do processo. O sucesso da operação de uma usina depende da detecção precoce de distúrbios do processo (ver capítulo 5.1). Só assim é possível identificar as causas a tempo e eliminá-las visando minimizar os danos econômicos.

A problemática da deficiência de micronutrientes e da inibição por amônia foi abordada nos capítulos 5.1.8 e 5.1.9.

Na operação de usinas de biogás, a queda da temperatura do processo pode ser causada por diversos fatores. Em virtude das temperaturas moderadas na Alemanha, o aquecimento dos biodigestores adquire um significado especial. Em caso de queda no seu funcionamento, a temperatura de digestão pode sofrer uma queda de vários graus em pouco tempo. A causa nem sempre é um defeito no sistema de aquecimento, o que mostra o seguinte cenário.

Se a usina de cogeração parar, o calor necessário para aquecer o biodigestor começa a escassear após um determinado tempo. A queda da temperatura inibe a atividade das bactérias metanogênicas, que apenas conseguem sobreviver em uma estreita faixa de temperatura [5-1]. Nesse aspecto, as bactérias hidrolíticas e acidogênicas são menos específicas, conseguindo sobreviver mesmo após uma queda da temperatura. A consequência, porém, é que os ácidos no digestor se tornam mais concentrados, principalmente se a introdução de substrato não for reduzida ou suspensa a tempo.

Em um caso como esse, além da inibição pela baixa temperatura, ocorre também uma queda do pH, com o aumento da acidez em todo o conteúdo do digestor.

A queda da temperatura do digestor também pode ser causada pela adição de grandes quantidades de substrato não pré-aquecido, ou pelo aquecimento insuficiente do digestor, p.ex. pela perda dos sensores de temperatura. O importante em um processo estável não é a temperatura absoluta, mas sim a temperatura constante. Uma alteração brusca de temperatura, seja ela um aumento ou uma queda, geralmente significa um risco ao processo de degradação. Por isso, o controle regular da temperatura de fermentação é de grande importância para a boa operação de uma usina.

Como mencionado no capítulo 5.1.3, o uso de determinados substratos pode ocasionar o aumento da temperatura do processo. A temperatura se desloca da faixa mesofílica para a termofílica sem que mais energia seja introduzida no sistema. Se a usina não for operada adequadamente, durante a passagem para a faixa termofílica o processo pode ser suspenso completamente no pior dos casos.

As condições operacionais de uma usina de biogás devem ser mantidas o mais constante possível. Isso vale tanto para as condições do meio no reator quanto para a constituição e dosagem do substrato. A alimentação de substrato pode causar problemas nos seguintes casos:

- uma quantidade muito grande de substrato é introduzida por um longo período
- o substrato é introduzido de forma irregular
- troca muito brusca de substratos com diferentes composições
- uma quantidade muito grande de substrato é carregada após uma pausa (p. ex. devido a falhas técnicas)

Os erros na alimentação de substrato ocorrem geralmente na fase de partida e na troca de substrato durante a operação regular. Por essa razão, essas fases

exigem que o processo seja monitorado com mais intensidade. Além disso, recomenda-se que os procedimentos de análise do processo sejam intensificados. Alguns substratos apresentam variações extremas em sua composição entre um lote e outro, o que pode acarretar oscilações indesejadas na carga orgânica volumétrica.

5.4.2 Manejo de distúrbios do processo

Como já foi mencionado, um distúrbio de processo só pode ser sanado definitivamente se a sua causa for identificada e eliminada. Há algumas medidas de controle, porém, que podem aliviar temporariamente a situação. A seguir, são descritas medidas básicas que visam à estabilização do sistema e seus efeitos. O sucesso dessas medidas depende principalmente da gravidade do distúrbio e até que ponto os microrganismos foram afetados. Além disso, o processo deve ser monitorado atentamente durante a execução das medidas e a subsequente fase de recuperação, permitindo que se avalie se a medida foi bem-sucedida e, se necessário, que se tomem outras medidas. Também são descritas as formas de eliminar os distúrbios de processo, conforme as causas expostas no capítulo anterior.

5.4.2.1 Medidas de estabilização do processo

Redução do volume carregado

A carga orgânica volumétrica é reduzida quando se diminui o volume carregado (sendo a composição do substrato constante). Essa é uma forma eficaz de aliviar o processo. Conforme o grau da redução da carga de substrato, o teor de metano do biogás aumenta sensivelmente. Isso é um indicativo da degradação dos ácidos graxos acumulados, embora o ácido acético seja degradado rapidamente e o ácido propiônico lentamente. Nos casos em que a concentração de ácido propiônico for muito alta, é possível que ele não seja mais degradado, o que exige outras medidas para aliviar o processo.

Se após a redução do volume carregado a produção de gás se mantiver constante, isso é um sinal de que o biodigestor está sobrecarregado. Os volumes de carregamento podem ser aumentados ligeiramente somente após o controle das concentrações de ácidos graxos e significativa redução da produção de gás.

Recirculação de material

Recircular o material significa retirá-lo de um reservatório a jusante (pós-digestor, reservatório de biofertilizantes) e reintroduzi-lo no biodigestor. O rebombeamento, desde que viável tecnicamente, produz principalmente dois efeitos positivos. Um dos efeitos é a diluição, ou seja, conforme a duração da recirculação, a "concentração de poluentes" no digestor é reduzida. O outro efeito é que no digestor são reintroduzidas bactérias que já haviam se tornado inativas por falta de alimento, reabilitando-as para o processo de degradação.

Esse procedimento é indicado principalmente para usinas de vários estágios. Em usinas de estágio único, esse procedimento deve ser adotado somente em reservatórios impermeáveis a gases e apenas em emergências. Durante a recirculação, observar a temperatura do material recirculado e aumentar o fornecimento de calor quando necessário para a manutenção da temperatura constante do biodigestor.

Esse procedimento é indicado principalmente para usinas de vários estágios. Em usinas de estágio único, esse procedimento deve ser adotado somente em reservatórios impermeáveis a gases e apenas em emergências. Durante a recirculação, observar a temperatura do material recirculado e aumentar o fornecimento de calor quando necessário para a manutenção da temperatura constante do biodigestor.

Alteração da composição do substrato

A alteração da composição do substrato carregado pode estabilizar o processo de diversas formas. A substituição ou retirada de componentes energéticos (p. ex. cereais) do substrato reduz a carga orgânica volumétrica, o que contribui para aliviar o sistema. Além disso, se o substrato for complementado com adubos orgânicos líquidos ou sólidos (p. ex. esterco líquido bovino), a presença dos micronutrientes e de outros grupos de bactérias pode provocar um efeito muito positivo. Um efeito igualmente positivo pode ser proporcionado pela adição de substrato em fermentação oriundo de outra usina. No que tange à digestão simples de biomassa, vale ressaltar que a adição de outro componente ao substrato normalmente tem efeitos positivos sobre a estabilidade do processo.

5.4.2.2 Deficiência de micronutrientes

Via de regra, uma deficiência de micronutrientes pode ser corrigida pelo acréscimo de adubos orgânicos (esterco bovino ou suíno, seja na forma líquida ou sólida). Se esses substratos não estiverem disponíveis em quantidade suficiente ou por alguma razão não puderem ser utilizados, pode-se optar pelos aditivos de micronutrientes oferecidos no mercado. Esse tipo de aditivo é normalmente constituído de uma mistura complexa. Os micronutrientes, porém, são metais pesados que em doses muito elevadas podem inibir o processo [5-16] e se acumular nas áreas agrícolas e, portanto, devem ser aplicados em quantidades mínimas [5-17]. Se possível, adicionar somente aqueles micronutrientes cuja deficiência seja efetivamente cons-



tatada. A análise de micronutrientes do material no biodigestor e dos materiais a serem carregados pode fornecer informações de grande auxílio, embora seja cara e trabalhosa.

Para aumentar a eficiência da adição de micronutrientes, pode-se antes aplicar sais de ferro objetivando a dessulfurização química (ver capítulo 2.2.4). Isso permite precipitar uma grande parte do sulfeto de hidrogênio diluído, melhorando a biodisponibilidade dos micronutrientes. É importante sempre observar as recomendações e instruções do fabricante.

5.4.2.3 Medidas contra a inibição por temperatura

Há duas formas de combater a inibição causada pelo aumento da temperatura do processo em função do autoaquecimento: resfriamento do processo ou migração da temperatura do processo. Em alguns casos, o resfriamento é possível por meio do sistema de aquecimento, o que geralmente é de difícil concretização. A introdução de água fria no sistema também é uma forma de resfriá-lo, o que porém deve ser feito com extrema cautela. Caso se opte pela migração da temperatura do processo da faixa mesofílica para a termofílica, é importante que se faça um monitoramento da atividade biológica durante o período de transição. Primeiro os microrganismos têm de se adaptar ao patamar mais elevado de temperatura, ou novos microrganismos têm de se multiplicar. Nesse período, o processo fica extremamente instável e em hipótese alguma pode ser interrompido pela adição excessiva de substrato.

5.4.2.4 Medidas corretivas da inibição por amônia

São necessárias intervenções profundas na operação da usina para reduzir a inibição por amônia. Normalmente, a inibição pela amônia ocorre no uso de substratos ricos em proteína. Se comprovado o efeito inibitório, deve-se reduzir a temperatura ou modificar a composição do substrato. A alteração da composição do substrato objetiva a redução da carga de nitrogê-

nio. Com isso, é possível reduzir de forma duradoura a concentração da amônia responsável pela inibição. Se o processo de acidificação estiver em estágio muito avançado, recomenda-se a permutação de biofertilizantes de um digestor a jusante a fim de reduzir temporariamente a concentração de ácidos.

Ambas as medidas devem ocorrer sob monitoração intensiva. A redução do pH visando à diminuição da fração de amônia é difícil de sustentar a longo prazo e portanto não recomendável.

5.4.2.5 Medidas contra a inibição por sulfeto de hidrogênio

A ocorrência de inibição por sulfeto de hidrogênio em usinas de biogás agrícolas é extremamente rara. Esse tipo de inibição ocorre quando o substrato apresenta altos teores de enxofre. As usinas de biogás agrícolas geralmente utilizam substratos com teores de enxofre relativamente baixos. Além disso, em função do seu efeito negativo sobre o aproveitamento do gás, seus teores de H₂S devem sempre ser reduzidos. Para combater a inibição por sulfeto de hidrogênio, pode-se adotar as seguintes medidas:

- adição de sais de ferro para precipitar o sulfeto
- redução da fração do substrato rica em enxofre
- dissolução em água.

A aplicação de tampões para elevar o pH pode reduzir temporariamente a toxicidade do H₂S, prática que, no entanto, deve ser evitada a longo prazo.

5.4.3 Manejo de falhas e problemas técnicos

A grande diversidade das usinas de biogás agrícolas quanto à arquitetura e equipamento técnico impossibilita qualquer generalização sobre como eliminar falhas técnicas e seu devido manejo. Recomenda-se consultar o manual de instruções da respectiva usina, o qual normalmente contém recomendações sobre como proceder para eliminar falhas nos diferentes componentes.

Tabela 5.7: Propriedades dos gases [5-6]

		Biogás	Gás natural	Propano	Metano	Hidrogênio
Poder calorífico inferior	kWh/m ³	6	10	26	10	3
Densidade	kg/m ³	1,2	0,7	2,01	0,72	0,09
Densidade relativa ao ar		0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Ponto de ignição	°C	700	650	470	600	585
Limites explosivos	% em vol.	6-22	4,4-15	1,7-10,9	4,4-16,5	4-77



Tabela 5.8: Propriedades dos componentes do biogás [5-6], [5-7], [5-8]

		CH ₄	CO ₂	H ₂ S	CO	H
Densidade	kg/m ³	0,72	1,98	1,54	1,25	0,09
Densidade relativa ao ar		0,55	1,53	1,19	0,97	0,07
Ponto de ignição	°C	600	-	270	605	585
Limites explosivos	% em vol.	4,4-16,5	-	4,3-45,5	10,9-75,6	4-77
LEO (valor MAK alemão)	ppm	N.E.	5000	10	30	N.E.

Em se tratando de falhas e problemas técnicos, é decisivo que sejam identificados e eliminados a tempo, o que exige obrigatoriamente a adoção de um sistema de alarme automatizado. O status operacional e os principais componentes da usina são monitorados no sistema de gerenciamento do processo. Em caso de falha técnica, o sistema emite uma mensagem de erro, que pode ser enviada por SMS ou telefone ao administrador e ao pessoal de operação. Esse procedimento permite que se reaja rapidamente em caso de falha. É importante também que o administrador mantenha um estoque selecionado de peças de reposição e sujeitas a desgaste a fim de evitar restrições mais prolongadas ao sistema. Isso permite reduzir os tempos de parada e reparos. Além disso, o administrador deve ter à sua disposição uma equipe de manutenção confiável que possa ser acionada em emergências. Comumente, essas equipes são oferecidas diretamente pelo fabricante da usina ou por oficinas externas. Para minimizar o risco de falhas técnicas, o administrador deve assegurar que se realizem controles regulares e se respeitem os intervalos de manutenção.

5.5 Segurança operacional

5.5.1 Proteção no trabalho e na usina

Biogás é uma mistura gasosa composta de metano (50% - 75% em vol.), dióxido de carbono (20% - 50% em vol.), sulfeto de hidrogênio (0,01% - 0,4% em vol.) e outros gases traço [5-1], [5-6]. A tabela 5.7 mostra as propriedades do biogás em comparação com outros gases. Na tabela 5.8 se encontra um resumo das propriedades de cada um dos gases componentes do biogás.

Em determinadas concentrações, o biogás se combina com o oxigênio do ar para formar uma atmosfera explosiva. Por essa razão, a construção e a operação de uma usina de biogás devem respeitar as normas de segurança relativas à proteção da usina. Também existem outros riscos tais como asfixia, intoxicação e da-

nos provocados por agentes mecânicos (p. ex. esmagamento por elementos móveis).

O empregador ou administrador tem a obrigação de identificar os riscos inerentes à operação da usina de biogás, avaliá-los e tomar as medidas necessárias. Nesse contexto, os "Preceitos de Segurança para Usinas de Biogás" da Associação Alemã de Cooperativas Profissionais Agrícolas [5-6] fornecem um resumo compacto dos aspectos fundamentais relevantes à segurança em usinas de biogás. Nessa publicação são explicadas e substanciadas as normas de segurança consoantes com a instrução de execução do § 1 da norma alemã de prevenção de acidentes "Arbeitsstätten, bauliche Anlagen und Einrichtungen" (locais de trabalho, construções e equipamentos) (VSG 2.1) [5-9] das Cooperativas Profissionais Agrícolas. Adicionalmente, a publicação contém referências a outras normas e recomendações técnicas a serem observadas.

Este capítulo objetiva dar um panorama dos riscos potenciais durante a operação de uma usina de biogás e sensibilizar o leitor sobre esse tema. A base da avaliação do risco e os aspectos técnicos de segurança associados à operação de uma usina refletem as atuais versões das normas citadas [5-6], [5-8], [5-9], [5-10].

5.5.1.1 Risco de explosão e incêndio

Foi mencionado na seção anterior que o biogás pode se combinar com o ar formando uma mistura de gases explosiva em determinadas condições. Os limites explosivos do biogás e de seus componentes são listados nas tabelas 5.7 e 5.8. Embora acima dos limites não haja o risco de explosão, incêndios podem ser provocados por chama aberta, fagulhas da ligação de aparelhos elétricos ou até mesmo por relâmpagos.

Na operação de usinas de biogás, portanto, deve-se considerar a hipótese da formação de misturas de gás e ar e do aumento do risco de incêndio, principalmente nas imediações dos biodigestores e gasômetros. As várias áreas da usina são classificadas nas denominadas "áreas sujeitas ao risco de explosão" (zonas "ex") [5-10], conforme a probabilidade da ocorrência de at-



mosferas explosivas. Essas áreas devem ser sinalizadas com placas de alerta e nelas devem ser tomadas medidas de prevenção e segurança.

Zona 0

Nas áreas da zona 0 ocorre continuamente uma atmosfera explosiva, por longos períodos ou com predominância [5-6], [5-10]. Tais áreas, no entanto, não são normalmente encontradas em usinas de biogás. O biodigestor também não constitui uma área desse tipo.

Zona 1

A zona 1 indica áreas em que ocasionalmente se origina atmosfera explosiva em operação normal. São áreas próximas a aberturas de entrada do gasômetro ou na lateral de condução de gás do digestor, bem como nas imediações de estruturas de soprimento, válvulas e dispositivos de sobrepressão ou tochas de gás [5-6]. Nessas áreas, deve-se tomar as medidas de segurança da zona 1 em um diâmetro de 1 m (sob ventilação natural). Ou seja, nessas áreas só é permitido utilizar equipamentos e aparelhos com proteção contra explosão homologados para as zonas 0 e 1. Como regra geral, em ambientes fechados evitar a liberação de biogás relacionada à operação. Se porém houver a possibilidade de liberação, a zona 1 se amplia para o ambiente inteiro [5-6].

Zona 2

Nessas áreas normalmente não é esperada a ocorrência de misturas de gás e ar explosivas. Se no entanto houver ocorrência, assume-se que ela seja rara e não perdure (p. ex. em trabalhos de manutenção ou em caso de falha) [5-6], [5-10].

Isso se aplica, p. ex., a aberturas de entrada e ao interior do digestor, bem como aos gasômetros nas imediações de aberturas de purga e ventilação. Nas áreas afetadas, implementar as medidas da zona 2 em um raio de 1 a 3 m [5-10].

Em áreas sujeitas a explosões (zona 0 - 2), deve-se tomar medidas conforme a BGR 104, seção E2, visando evitar fontes de ignição [5-10]. Exemplos de fontes de ignição são superfícies quentes (turbocompressor), chamas abertas ou fagulhas geradas mecânica ou eletricamente. Essas áreas devem ser também sinalizadas com placas de alerta e perigo.

5.5.1.2 Risco de intoxicação e asfixia

A liberação de biogás é um processo natural conhecido e portanto não restrito à atividade de usinas de

biogás. Em especial na pecuária foram registrados repetidos casos de acidentes, alguns fatais, associados a gases biogênicos (p. ex. em fossas de esterco, silos de forragem, etc.).

Se a concentração do biogás for suficientemente alta, a sua inalação pode acarretar sintomas de intoxicação e asfixia, podendo até levar à morte. Especialmente a fração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) do biogás não dessulfurizado tem efeito muito tóxico já em pequenas concentrações (ver tabela 5.9).

Tabela 5.9: Efeito tóxico do sulfeto de hidrogênio [5-7]

Concentração (no ar)	Efeito
0,03 - 0,15 ppm	Limite de percepção (odor de ovo podre)
15 - 75 ppm	Irritação dos olhos e vias respiratórias, enjoo, vômito, dores de cabeça, desmaios
150 - 300 ppm (0,015-0,03 %)	Paralisia dos nervos olfativos
> 375 ppm (0,038 %)	Morte por intoxicação (após várias horas)
> 750 ppm (0,075 %)	Desmaio e morte por parada respiratória em 30 - 60 min.
a partir de 1000 ppm (0,1 %)	Morte em poucos minutos por paralisia respiratória

Além disso, principalmente em ambientes fechados ou profundos, pode ocorrer asfixia pela expulsão do oxigênio pelo biogás. Embora o biogás seja mais leve que o ar e apresente uma densidade relativa (D) de aprox. 1,2 kg por m^3 , tem a tendência a segregar-se. O dióxido de carbono ($D = 1,98 \text{ kg}/m^3$), mais pesado, se acumula próximo ao piso, e o metano ($D = 0,72 \text{ kg}/m^3$) sobe por ser mais leve.

Por isso, ambientes fechados como gasômetros fechados sempre devem ter suficiente ventilação. Além disso, utilizar equipamento de proteção individual durante trabalhos em áreas potencialmente perigosas (biodigestor, acessos de manutenção, reservatório de gás, etc.), p. ex. aparelhos sensores de gás, máscara, etc.

5.5.1.3 Conservação e manutenção

Como regra geral, realizar a manutenção de equipamentos de bombeamento, agitação e enxágue acima do nível do solo [5-6]. Caso isso não seja possível, instalar ventilação forçada a fim de prevenir contra o risco de intoxicação e asfixia em caso de escape de gás.

5.5.1.4 Manuseio de produtos químicos

Usinas de biogás utilizam diversos produtos químicos. São utilizados principalmente sais de ferro para a dessulfurização química, aditivo para a estabilização do pH e misturas complexas de enzimas e micronutrientes para a otimização do processo. Os aditivos podem ser obtidos tanto na forma líquida como sólida (pó). Uma vez que esses produtos geralmente têm propriedades tóxicas e corrosivas, antes do uso observar rigorosamente as informações do produto e as indicações do fabricante quanto à dosagem e aplicação (p. ex. máscara anti-pó, luvas resistentes a ácidos, etc.). Manter os níveis de produtos químicos ao mínimo necessário.

5.5.1.5 Outros riscos potenciais de acidentes

Além das fontes de perigo descritas, existe também o risco de queda de escadas ou em aberturas de enchimento (dosadora de sólidos, tremonhas, acessos de manutenção, etc.), entre outros. Garantir que se possa evitar quedas pelas coberturas (portinholas, grelhas) ou que sejam construídas a altura suficientemente alta (> 1,8 m) [5-6]. As partes móveis da usina (eixos de agitação, roscas de transporte) também representam uma fonte extra de risco e devem ser assinaladas apropriadamente por meio de placas.

Em usinas de cogeração, a operação não condizente com os preceitos técnicos ou a ocorrência de defeitos podem acarretar choques elétricos fatais, uma vez que elas geram tensões de várias centenas de volts e amperagens na casa dos três dígitos. O mesmo perigo representam os agitadores, as bombas, os dispositivos de alimentação etc., pois esses equipamentos também operam com potência elétrica elevada.

Além disso, existe o risco de queimaduras no caso de falhas dos sistemas de aquecimento/resfriamento de uma usina de biogás (radiador do motor, aquecimento do biodigestor, trocador de calor, etc.). Isso diz respeito também a partes da usina de cogeração e de sistemas de emergência eventualmente existentes (p. ex. flares para a queima de gás).

Visando evitar acidentes desse gênero, afixar avisos bem visíveis nos respectivos componentes da usina e instruir o pessoal adequadamente.

5.5.2 Proteção do meio ambiente

5.5.2.1 Requisitos de higienização

O objetivo da higienização é neutralizar germes e patógenos possivelmente contidos no substrato, tornando-o inócuo do ponto de vista epidêmico e fitossanitário. Ela é necessária se além das matérias-primas e restos de origem agrícola forem utilizados também resíduos biogênicos de outras procedências.

Nesse quadro, o regulamento da CE nº 1774/2003 e o Regulamento Alemão de Resíduos Orgânicos constituem a legislação pertinente [5-13]. O regulamento da CE contém normas de higiene para o manuseio de subprodutos de origem animal não destinados ao consumo humano [5-11]. Conforme autorização oficial, usinas de biogás têm permissão para utilizar material da categoria 2 após esterilização a vapor sob pressão (fragmentação < 55 mm, 133 °C a 3 bar de pressão por no mínimo 20 minutos [5-12]), esterco líquido, material oriundo do trato digestivo sem pré-tratamento e material da categoria 3 (p. ex. resíduos de abatedouros) após higienização (aquecimento a no mínimo 70 °C por mais de 1 hora). O citado regulamento, porém, é raramente aplicado em usinas de biogás agrícolas. O uso exclusivo de resíduos de cozinha e de alimentos como subprodutos animais não se enquadra na aplicação do regulamento. Se forem utilizadas substâncias previstas no Regulamento Alemão de Resíduos Orgânicos, a sua higienização é obrigatória. Nesse caso, respeitar a temperatura mínima de 55 °C e o tempo de retenção hidráulica no biorreator de no mínimo 20 dias.

5.5.2.2 Controle da poluição atmosférica

A operação de usinas de biogás está sujeita a diversas exigências quanto ao controle da poluição atmosférica, com destaque para o controle de odores e emissão de poluentes e poeira [5-12]. A base jurídica maior é a Lei Alemã de Proteção contra Emissões (BImSchG) e respectivos atos executivos, bem como a Diretriz Técnica Alemã para o Controle da Poluição Atmosférica (TA Luft). O objetivo da lei é proteger o ambiente contra a ação de efeitos nocivos e prevenir que tais efeitos ocorram. No âmbito do processo de concessão de licença, essa norma jurídica se aplica somente a usinas de biogás de grande porte com potência total de 1 MW ou superior, e em usinas destinadas ao tratamento de resíduos biológicos.



5.5.2.3 Proteção das águas

A operação de uma usina de biogás deve ter como meta que o seu impacto negativo sobre o meio ambiente seja o mínimo possível. No que tange à proteção das águas, em linhas gerais isso significa que a arquitetura da usina tem de ser tal que não acarrete impurezas às águas superficiais e ao lençol freático. Os requisitos específicos da proteção das águas dependem, entre outros fatores, das características naturais do local (p. ex. área de proteção de águas) e estão sujeitos à avaliação pelas autoridades, o que explica as variações existentes na legislação conforme a região.

Matérias como o esterco líquido, o adubo líquido e os efluentes de silagem, encontradas principalmente em usinas de biogás agrícolas, pertencem à classe 1 de risco às águas (risco baixo), e as biomassas dedicadas recebem a mesma classificação [5-14]. Por conseguinte, a contaminação das águas superficiais e subterrâneas por essas matérias deve ser evitada ao longo de toda a cadeia do processo. Isso significa na prática que todos os locais de armazenamento, reservatórios de estoque e de digestão, bem como as tubulações e bombas, devem ser construídos com impermeabilidade a líquidos e obedecendo às normas. Atenção especial merecem os locais de silagem, uma vez que em safras com condições desfavoráveis e elevadas pressões de compactação pode ocorrer uma grande quantidade de efluentes. É obrigatório que se colem os efluentes de silagem e fermentados para que sejam processados. Como eles geralmente contêm elevados teores de matéria orgânica, é oportuno que sejam encaminhados para o biodigestor. Recomenda-se a separação estrita entre a água não contaminada e a contaminada a fim de que não sejam introduzidas no processo grandes quantidades de água não contaminada sem necessidade, principalmente após fortes precipitações atmosféricas. Isso pode ser atingido por meio de sistemas de drenagem separados, que utilizam duas vias condutoras e registro manual para desviar a água não contaminada para a descarga e a água contaminada e percolados para o biodigestor [5-15].

Além disso, também merecem atenção especial as passagens entre os diferentes estágios, especialmente a recepção do substrato (sólidos e líquidos) e a transferência dos biofertilizantes para os veículos de transporte e deposição. Deve-se evitar a saída indesejada de material (p. ex. por transbordamento ou quantidades residuais), ou assegurar a coleta das águas contaminadas dessas áreas.

Também devem ser previstos os locais de instalação da usina de cogeração, bem como o armazenamento de óleo novo, usado e, se for o caso, de óleo de ignição, conforme a legislação em vigor. Identificar e eliminar possíveis vazamentos, tais como de óleo de motor e engrenagens [5-14].

5.5.2.4 Proteção contra ruído

Em geral, a maior parte do ruído produzido em usinas de biogás é proveniente do trânsito de veículos. A frequência e a intensidade do ruído dependem muito do conceito de usina e dos substratos utilizados. Na maior parte das usinas de biogás agrícolas, o ruído do trânsito é produzido na operação de carregamento do substrato (sistema de transporte, armazenamento e dosagem) durante cerca de 1 a 2 horas e praticamente todos os dias. A colheita e armazenamento do substrato bem como o transporte dos biofertilizantes são operações que também envolvem o trânsito de veículos e, portanto, maior nível de ruído.

Outras máquinas que produzem ruídos, p. ex. as utilizadas no processamento do gás em uma usina de cogeração, normalmente são instaladas em áreas fechadas e isoladas acusticamente. A versão mais recente da diretriz técnica alemã para a proteção contra ruídos (TA Lärm) constitui a base jurídica para as emissões acústicas.

5.6 Notas sobre a otimização de usinas

A otimização tem como objetivo modificar o estado atual de um processo, quanto a determinadas características, pela variação de fatores influentes, de modo a atingir um determinado estado-alvo denominado estado ótimo.

Em geral, é possível otimizar a operação de uma usina de biogás quanto à sua economia, tecnologia e impacto ambiental (figura 5.8). Por interagirem entre si, esses aspectos não podem ser otimizados separadamente. Além disso, ao resolver um problema de otimização, não se deve esperar que haja apenas uma solução, mas sim um leque de diferentes soluções.

Assim, as diferentes soluções podem ser comparadas entre si com base em critérios de avaliação. Para avaliar a solução proposta, pode-se lançar mão de critérios como o custo, a produção de gás ou a mitigação dos impactos ambientais. Em consonância com metas abrangentes, os critérios de avaliação são ponderados

a fim de se traçar uma avaliação conclusiva que permita a decisão por uma ou outra medida.

Em termos práticos, todo administrador de uma usina de biogás consciente deve agir no sentido de buscar o estado geral ideal permitido pelas condições e especificidades da operação. No caso de mudança das condições, deve-se averiguar se as metas até então almeçadas devem permanecer ou ser ajustadas à nova situação.

A otimização pressupõe a definição do estado atual e do estado-alvo. A definição do estado atual se dá pelo levantamento dos dados apropriados na operação da usina. Se p. ex. a demanda energética da usina tiver de ser reduzida, há que se investigar que componentes contribuem para o consumo de energia e quanta energia é consumida. A determinação do estado-alvo pode se dar por dados de planejamento, dados equivalentes relativos ao desempenho da tecnologia adotada, publicações sobre o estado da técnica, depoimentos de outros administradores (tais como fóruns, reuniões com especialistas, etc.) e pareceres.

Definidos os estados atual e alvo, o passo seguinte é a definição de valores concretos a serem almeçados, a aplicação de medidas para atingir esses valores e a validação das medidas quanto ao cumprimento das metas e possíveis efeitos sobre outras áreas.

Em vista das deficiências principalmente no campo da obtenção e documentação de dados de processo relevantes, observadas em muitas usinas, nem sempre é possível traçar uma análise qualificada da situação atual. Por conseguinte, observa-se também a escassez de dados para a geração de valores comparativos. Uma compilação abrangente de dados relevantes a processos foi realizada como parte dos programas alemães de levantamento [5-38]. Além disso, a KTBL (Curadoria Alemã para a Tecnologia e Construção na Agricultura) publica dados característicos da operação de usinas de biogás.

A diretriz VDI 4631 "Critérios de qualidade para usinas de biogás" contém os valores característicos fundamentais para a avaliação de processos. Ela também inclui extensas checklists úteis para a obtenção de dados.

A seguir são listados alguns parâmetros úteis para a avaliação e otimização de usinas de biogás.

Como regra geral, as condições operacionais devem se manter constantes durante o funcionamento da usina. Só assim é possível definir o estado atual com exatidão. Se a usina for submetida a mudanças em seu conceito, as metas do processo têm de ser ajustadas correspondentemente.



Figura 5.8: Possibilidades de otimização

5.6.1 Otimização técnica

A otimização dos processos técnicos em uma usina de biogás se foca na alta disponibilidade dos equipamentos, ou seja, na minimização das paradas e na realização do processo sem contratempos.

Evidentemente essa meta tem consequências indiretas sobre a economia da usina, uma vez que ela só pode cumprir suas metas de produção se operar em capacidade elevada. Por outro lado, como a adoção de altas tecnologias implica custos elevados, a respectiva análise de custo/benefício deve se dar no escopo da otimização econômica.

Para a estimativa da disponibilidade de toda a usina, geralmente são registradas e documentadas as horas de operação e as horas em carga plena. A documentação adicional dos tempos de parada com respectivas causas de falha bem como o tempo de manutenção e o seu custo financeiro permitem identificar os calcanhares de Aquiles do processo.

De forma geral, é possível melhorar a disponibilidade de equipamentos técnicos com as seguintes medidas:

- Respeitar intervalos de manutenção
- Realizar manutenção preventiva
- Uso de equipamentos de medição para detectar falhas
- Manter estoques de peças de reposição
- Rápida disponibilidade de apoio técnico do fabricante ou oficinas regionais
- Redundância na construção dos componentes críticos
- Uso de tecnologias e materiais com baixo desgaste.

A funcionalidade da tecnologia é o pré-requisito para a estabilidade do processo de digestão. O processo biológico é diretamente afetado em caso de paradas no carregamento ou agitação do substrato. Maiores informações sobre a otimização da biologia se encon-



tram nas seções relevantes deste capítulo, bem como no capítulo 2.

5.6.2 Análise da eficiência da usina como um todo (utilização do substrato com base nos fluxos de energia)

Se a usina opera com elevada utilização do equipamento, em determinadas circunstâncias é possível elevar a eficiência por meio da investigação da demanda energética da usina e possíveis perdas de energia seguida da redução das perdas. É recomendável que se analise a usina como um todo a fim de identificar os principais fluxos de energia e pontos frágeis. Considerar as seguintes subáreas:

- Disponibilização de substrato (quantidade e qualidade do substrato, qualidade da ensilagem, introdução de substrato)
- Perdas na ensilagem (qualidade da ensilagem, taxa de alimentação, tamanho das superfícies de corte, água de percolação)
- Biologia do processo (intervalos de alimentação, taxa de degradação atingida, quantidade e composição específicas do biogás, estabilidade do equipamento, composição do substrato, concentrações de ácidos)
- Utilização do gás (eficiência térmica e elétrica da usina de cogeração, escape de metano, ajustes de motores, intervalos de manutenção)
- Biofertilizantes (potencial de gás residual de biofertilizantes, aproveitamento de biofertilizantes)
- Perdas de metano (emissões por vazamentos)
- Carga de trabalho da operação da usina, eliminação de falhas, paradas
- Consumo de energia no local
 - Registro regular de contadores (consumo de energia, períodos)
 - Delimitação clara dos consumidores de energia elétrica (p. ex. agitadores, sistemas de carregamento, usina de cogeração, etc.)
 - Ajuste dos sistemas de agitação, tempos e intensidade da agitação às condições
 - Não bombear volumes sem necessidade
 - Utilizar técnicas econômicas de carregamento e preparo do substrato
- Conceito de aproveitamento do calor.

A ideia principal a ser considerada é que uma usina de biogás é um sistema composto de um grande número de componentes que devem operar em harmonia entre si. Por isso, já durante a fase de planeja-

mento, considerar que o circuito deve funcionar como um todo, sendo que a compra de componentes separados que funcionam não significa necessariamente que a usina funcionará bem.

Na prática, observa-se frequentemente que a cadeia de processos possui um gargalo que limita o aproveitamento total dos elementos a jusante e seu uso econômico. Em muitas usinas, por exemplo, a capacidade de geração de gás não esgota a capacidade da usina de cogeração. Porém, seria possível atingir a produção de gás necessária, por exemplo, pela modificação da mistura do substrato ou pelo melhor aproveitamento da capacidade do 2º estágio de digestão.

Assim, além do balanço de fluxos de energia, o balanço de fluxo de material também é uma forma apropriada de evidenciar déficits na operação da usina.

5.6.3 Otimização econômica

A otimização econômica tem como meta a redução dos custos e o aumento da receita. A exemplo da otimização técnica, a otimização econômica também pode ser aplicada em cada um dos subprocessos. Aqui também são identificadas as fontes dos custos em um primeiro momento, para em seguida reduzir esses custos.

Como base para uma avaliação inicial do desempenho da usina como um todo, podem ser usados parâmetros específicos como o custo da conversão em eletricidade (p. ex. em R\$/kWh) ou custos específicos de investimento (em R\$/kW elétrico instalado). Para isso, existem estudos comparativos (p. ex. o programa alemão de levantamento, [5-38]), que permitem a classificação da economia global da usina. Para uma investigação detalhada, são úteis a análise e comparação das seguintes variáveis econômicas:

- Custos operacionais
 - Custos com pessoal
 - Custos de manutenção
 - Custos de reparos
 - Custos de energia
 - Custos de conservação
- Custos de investimento (depreciação), amortização, juros
- Custos do substrato (associados à qualidade e quantidades do substrato)
- Receitas da eletricidade e calor produzidos
- Receitas dos substratos
- Receitas dos biofertilizantes/adubos.

5.6.4 Mitigação dos impactos ambientais

A mitigação dos impactos ambientais objetiva a redução dos efeitos sobre o meio ambiente. Ela considera a liberação de poluentes no ar, água e solo.

- Água de percolação (captação e aproveitamento de percolados de silagem, drenagem de áreas de armazenamento)
- Emissões de metano da usina de biogás (cobertura de biofertilizantes com impermeabilidade a gás, identificação de vazamentos, escape do gás na utilização, ajustes de motores, manutenção)
- Formaldeído, NO_x, óxidos de enxofre, monóxido de carbono (somente em usina de cogeração, ajustes de motores, tratamento de gases de exaustão)
- Emissão de maus odores (alimentação coberta, áreas de armazenamento e reservatório de biofertilizantes, biofertilizantes separados)
- Emissões de ruídos
- após deposição dos biofertilizantes: emissões de amônia e óxido nitroso (tecnologia de deposição e incorporação).

Além de terem efeitos negativos sobre o meio ambiente, as emissões descontroladas de percolado de silagem, metano e amônia também afetam negativamente a eficiência da usina. Isso justifica medidas construtivas ou operacionais para a redução de emissões, que podem ser muito rentáveis economicamente (p. ex. a impermeabilização a gases de reservatórios de biofertilizantes por meio de coberturas). Como regra geral, a usina deve ser inspecionada regularmente quanto a possíveis emissões, levando em conta, além dos aspectos econômicos e ambientais, também a questão da segurança.

5.7 Fontes bibliográficas

- [5-1] Kloss, R.: Planung von Biogasanlagen; Oldenbourg Verlag Munique, Viena, 1986
- [5-2] Kroiss, H.: Anaerobe Abwasserreinigung; Wiener Mitteilungen vol. 62; Technische Universität Wien, 1985
- [5-3] Weiland, P.: Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI-Berichte, nº 1620 "Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven"; pp. 19 – 32; VDI-Verlag 2001
- [5-4] Resch, C.; Wörl, A.; Braun, R.; Kirchmayr, R. : Die Wege der Spurenelemente in 100% NAWARO Biogasanlagen; 16. Symposium Bioenergie-Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas; Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2007
- [5-5] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Nova Iorque, 2001
- [5-6] Technische Information 4, Sicherheitsregeln für Biogasanlagen; Bundesverband der landw. Berufsgenossenschaften e.V.; Kassel 2008
- [5-7] Falbe, J. et al. (Hrsg); Römpf Chemie Lexikon; Georg Thieme Verlag; 9ª edição: Stuttgart, 1992
- [5-8] Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900); Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; download em 30.06.09; http://www.baua.de/nn_5846/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-900__content.html?__nnn=true
- [5-9] "Arbeitsstätten, bauliche Anlagen und Einrichtungen" (VSG 2.1); Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften; download em 30.06.09; http://www.lsv.de/lsv_all_neu/uv/3_vorschriften/vsg21.pdf
- [5-10] BGR 104 – Explosionsschutz-Regeln, Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung zur Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen; Carl Heymanns Verlag; Colônia, 2009
- [5-11] Regulamento (CE) nº 1774 do Parlamento Europeu e do Conselho; Bruxelas 2002
- [5-12] Görsch, U.; Helm, M.: Biogasanlagen-Planung, Errichtung und Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen; Eugen Ulmer Verlag, 2ª edição, Stuttgart 2007
- [5-13] Verordnung über Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV), 1998
- [5-14] "Errichtung und Betrieb von Biogasanlagen-Anforderungen für den Gewässerschutz"; Anlagenbezogener Gewässerschutz volume 14; Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, 2007
- [5-15] Verhülsdonk, C.; Geringhausen, H.: Cleveres Drainage-System für Fahrsilos; top agrar nº 6/2009
- [5-16] Seyfried, C.F. et al.: Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern. Korrespondenz Abwasser 37, pp. 1247 – 1251, 1990
- [5-17] Bischoff, M.: Erkenntnisse beim Einsatz von Zusatz- und Hilfsstoffen sowie Spurenelementen in Biogasanlagen; VDI Berichte nº 2057; "Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft"; VDI Verlag, Düsseldorf, 2009, pp. 111 – 123
- [5-18] Weißbach, F. e C. Strubelt: Die Korrektur des Trockenstoffgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 63 (2008), H. 2. pp. 82 – 83
- [5-19] Kranert, M. Untersuchungen zu Mineralgehalten in Bioabfällen und Gärückständen in Müll und Abfall Edição 11/2002 pp. 612 – 617
- [5-20] Tippe, H. (1999): Prozessoptimierung und Entwicklung von Regelungsstrategien für die zweistufige thermophile Methanisierung ligno-zellulosehaltiger Feststoffsuspensionen, Dissertation an der TU Berlin, Fachbereich 15, Lebensmittelwissenschaften und Biotechnologie.



- [5-21] Kroeker, E.J., Schulte, D. D. (1979): Anaerobic treatment process stability in *Journal water pollution control Federation* Washington D.C. 51 pp. 719 - 728
- [5-22] Bischofberger, W.; Böhnke, B.; Seyfried, C.F.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.H. (2005): *Anaerobtechnik*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg Nova Iorque;
- [5-23] Braun, R. (1984): *Biogas-Methangärung organischer Abfallstoffe*, 1ª ed. Springer-Verlag, Viena, Nova Iorque.
- [5-24] K. Buchauer; A comparison of two simple titration procedures to determine volatile fatty acids in influents to waste-water and sludge treatment processes; *Water SA* Vol. 24 N° 1; janeiro de 1998
- [5-25] Rieger, C. e Weiland, P. (2006): Prozessstörungen frühzeitig erkennen in *Biogas Journal* 4/06 pp. 18 – 20
- [5-26] Braha, A. (1988): *Bioverfahren in der Abwassertechnik: Erstellung reaktionskinetischer Modelle mittels Labor-Bioreaktoren und Scaling-up in der biologischen Abwasserreinigung*. Udo Pfriemer Buchverlag in der Bauverlag GmbH, Berlin und Wiesbaden
- [5-27] Sahn, H. *Biologie der Methanbildung*, *Chemie-Ingenieur Technik* 53, n° 11 (1981)
- [5-28] Europäische Patentanmeldung Patentblatt 2008/49, Anmeldenummer 08004314.4. Oechsner, Hans et al. 2008
- [5-29] Mudrack und Kunst: *Biologie der Abwasserreinigung* Spektrum Verlag 2003
- [5-30] Dornak, C; (2000): *Möglichkeiten der Optimierung bestehender Biogasanlagen am Beispiel Plauen/Zobes in Anaerobe biologischen Abfallbehandlung*, Atas do Congresso Fachtagung 21-22.2. 2000, Beiträge zur Abfallwirtschaft Band 12, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden
- [5-31] Resch, C.; Kirchmayer, R.; Grasmug, M.; Smeets, W.; Braun, R. (2005) Optimised anaerobic treatment of household sorted biodegradable waste and slaughterhouse waste under high organic load and nitrogen concentration in half technical scale. In conference proceedings of 4 th International symposium of anaerobic digestion of solid waste 31.8.05 – 2.9.05 Copenhagen
- [5-32] Mc Carty, P.L.; McKinney (1961): Salt toxicity in anaerobic digestion *Journal water pollution control Federation* Washington D.C. 33, 399
- [5-33] Mc Carty, P.L. (1964): *Anaerobic waste treatment Fundamentals – Part 3 Toxic material and their controls* Pub. Works Nov., 91
- [5-34] Angelidaki, I.; Ahring, B.K. (1994): Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. *Wat Res* 28: 727–731
- [5-35] Liebetrau, J. *Regelungsverfahren für die anaerobe Behandlung von organischen Abfällen*, Rhombos Verlag 2008
- [5-36] Holubar, P.; Zani, L.; Hager, M.; Fröschl, W.; Radak, Z.; Braun, R.; (2003): Start up and recovery of a biogas reactor using a hierarchical network based control tool, *J.Chem.Technol. Biotechnol.* 78 847-854
- [5-37] Heinzle, E.; Dunn, I.J.; Ryhiner, G.B. (1993): *Modelling and control for Anaerobic Wastewater treatment*, Advances in Biochemical Engineering Biotechnology, Vol. 48, Springer Verlag 1993
- [5-38] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): *Biogas-Messprogramm II*, Gülzow, 2009

Tratamento do Biogás e Opções de Utilização



A utilização atual do biogás na Alemanha se caracteriza pela conversão descentralizada do gás bruto em eletricidade no local de origem. Normalmente, são utilizados geradores acionados por motores de combustão para produzir a energia elétrica. Também é possível utilizar o biogás em microturbinas a gás, células de combustível e motores Stirling. A princípio, embora essas técnicas também sirvam para converter o biogás em energia elétrica, até hoje vêm sendo pouco utilizadas para essa finalidade. Outra possibilidade é o aproveitamento do calor em queimadores e caldeiras adequados.

Além disso, nos últimos anos vem se popularizando a opção de tratamento do biogás e consequente injeção na rede de gás natural. Em agosto de 2010, a Alemanha já contava com 38 usinas que injetavam o biometano tratado na rede de gás natural [6-9]. Nos próximos anos, um grande número de projetos será concretizado. Digna de nota é a ambiciosa meta do governo alemão, cuja expectativa é a de que até 2020 seis bilhões de metros cúbicos de gás natural por ano sejam substituídos por biogás. Uma alternativa à injeção na rede de gás natural é o uso direto do biometano como combustível, prática ainda pouco disseminada na Alemanha.

Geralmente não é possível aproveitar diretamente o biogás bruto produzido em uma usina em virtude de suas substâncias específicas como o sulfeto de hidrogênio. Por essa razão, o biogás é submetido a vários estágios de purificação, que combinados de diferentes formas são o pré-requisito das opções de utilização mencionadas no início do capítulo.

6.1 Purificação e tratamento do biogás

Em sua forma bruta, o biogás é completamente saturado de vapor de água e, além do metano (CH_4) e do dióxido de carbono (CO_2), contém quantidades não

desprezíveis de sulfeto de hidrogênio (H_2S), entre outras substâncias.

O sulfeto de hidrogênio é tóxico e exala um odor desagradável de ovo podre. O vapor contido no biogás se combina com o sulfeto de hidrogênio originando ácido sulfúrico. Os ácidos atacam os motores utilizados no processamento do biogás, bem como os componentes instalados a jusante tais como tubulação de gás, tubo de exaustão, etc. Os compostos de enxofre também reduzem a eficiência dos estágios de processamento localizados a jusante (eliminação do CO_2).

Por essas razões, usinas de biogás agrícolas normalmente realizam a dessulfurização e a secagem do biogás gerado. Conforme as substâncias concomitantes contidas no biogás ou as tecnologias de aproveitamento utilizadas (p. ex. substituição de gás natural), porém, pode ser necessário que o gás receba tratamento adicional. Os fabricantes de usinas de cogeração definem padrões mínimos de qualidade das propriedades dos gases combustíveis utilizados. Esses padrões são válidos também na utilização de biogás. Os requisitos de qualidade do gás combustível devem ser respeitados a fim de evitar intervalos de manutenção mais curtos ou danos nos motores.

6.1.1 Dessulfurização

Existem diferentes processos para realizar a dessulfurização. Os processos se classificam em biológicos, químicos e físicos. Conforme a aplicação, distinguem-se a dessulfurização fina e a grossa. O processo ou a combinação de processos adotada se orienta pela destinação subsequente do biogás. A tabela 6.1 apresenta uma comparação dos processos analisados.

Além da composição do gás, tem papel fundamental a taxa de vazão do biogás pelo equipamento de dessulfurização. Em dependência da condução do processo, a vazão pode oscilar substancialmente. Taxas de liberação de biogás temporariamente elevadas

Tabela 6.1: Processos de dessulfurização [6-32]

Processo	Consumo energético		Insumos indiretos		Injeção de ar	Pureza em ppmv	Diretriz DVGW satisfeita? ^a	Problemas
	elétr.	térm.	Consumo	Eliminação				
Biodessulfurização no digestor	++	o	++	++	Sim	50-2.000	Não	Falta de exatidão no controle do processo
Biodessulfurização externa	-	o	+	+	Sim	50-100	Não	Falta de exatidão no controle do processo
Lavador biológico de gás	-	o	-	+	Não	50-100	Não	Complexidade elevada
Precipitação de sulfeto	o	o	--	o	Não	50-500	Não	Processo lento
Dessulfurização química interna	o	o	--	--	Sim	1-100	Não	Efeito purificador reduzido drasticamente
Carvão ativado	o	o	--	-	Sim	< 5	Sim	Grandes quantidades eliminadas

a. conforme diretriz DVGW G 260
 ++ muito vantajoso, + vantajoso, o neutro, - desvantajoso, -- muito desvantajoso

Tabela 6.2: Valores característicos e parâmetros operacionais da biodessulfurização no biodigestor

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> fornecimento de ar 3% - 6% em vol. da quantidade de biogás liberada
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> em qualquer digestor com gasômetro suficientemente grande sobre o digestor posterior injeção na rede de gás natural não recomendada
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + muito barato + não exige o uso de produtos químicos + tecnologia de baixa manutenção e pouco sujeita a falhas + o enxofre volta para os biofertilizantes e pode ser aplicado como adubo
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - não se orienta pela quantidade de sulfeto de hidrogênio efetivamente liberada - não possibilita a otimização da remoção do sulfeto de hidrogênio - a injeção de oxigênio pode prejudicar o processo e oxidar o metano - oscilações de temperatura no gasômetro entre o dia e a noite e ao longo do ano podem ter efeito negativo sobre a eficácia da dessulfurização - não é possível reagir a oscilações na quantidade de gás liberada - corrosão no biodigestor e risco de formação de misturas gasosas explosivas - não adequado para o tratamento visando qualidade equivalente à do gás natural - redução do poder calorífico inferior/poder calorífico superior
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> superfícies de crescimento para bactérias redutoras de enxofre devem existir ou ser adicionalmente criadas, pois a superfície existente geralmente não é suficiente para a dessulfurização otimização pelo controle do fornecimento de oxigênio no reator e medição contínua do sulfeto de hidrogênio
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> minicompressor ou bomba de aquário com válvula de controle a jusante e indicador de vazão para o controle manual do fluxo de gás
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> quase desnecessária

e vazões elevadas associadas podem ser observadas após a alimentação do digestor com substrato fresco e durante a operação dos agitadores. Podem ocorrer vazões momentâneas de 50% acima da média. Para garantir a eficiência da dessulfurização, é comum

que se utilizem equipamentos de dessulfurização superdimensionados ou que se combinem diferentes técnicas.

6.1.1.1 Biodessulfurização no biodigestor

A biodessulfurização é frequentemente realizada no biodigestor, embora também existam técnicas em que o processo é localizado a jusante. Na presença de oxigênio, a bactéria *Sulfobacter oxydans* converte o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar, que em seguida é descarregado do reator pelos biofertilizantes. A conversão exige nutrientes, que existem no biodigestor em quantidades suficientes. Como as bactérias são onipresentes, não precisam ser adicionadas. O oxigênio necessário é disponibilizado pelo sopramento de ar, por exemplo por meio de uma bomba de aquário ou outro tipo de minicompressor, e introduzido no biodigestor. A qualidade obtida é em geral suficiente para a queima do gás dessulfurizado em usinas de cogeração. Somente no caso de variações de concentração no gás bruto é que podem ocorrer rupturas na concentração de enxofre, podendo levar a efeitos negativos sobre a usina de cogeração. Por outro lado, este tipo de tratamento não é adequado quando se visa obter qualidade de gás natural, uma vez que as altas concentrações de nitrogênio e oxigênio dificilmente podem ser eliminadas, o que piora as propriedades comburentes do gás. As propriedades de biodessulfurização no biodigestor são mostradas na tabela 6.2 e um exemplo é exibido na figura 6.1.

6.1.1.2 Biodessulfurização em biodigestores externos – técnica com filtros percoladores

Para evitar as desvantagens citadas, a biodessulfurização também pode ser realizada fora do biodigestor por meio de filtros percoladores. Para isso, algumas empresas oferecem colunas de biodessulfurização dispostas em reservatórios separados. Isso possibilita o controle rigoroso das condições necessárias para a dessulfurização, como a alimentação de ar e oxigênio. Para potencializar o efeito adubador do substrato digerido, o enxofre precipitado pode ser novamente adicionado ao substrato digerido no depósito de biofertilizantes.

O processo do filtro percolador, no qual o sulfeto de hidrogênio é absorvido com o auxílio de um meio de lavagem (regeneração da solução pela adição de oxigênio do ar), atinge taxas de decomposição de até 99%, o que pode levar a concentrações de gás residual inferiores a 50 ppm de enxofre [6-24]. Em virtude da elevada injeção de ar de cerca de 6%, esse método não é adequado para o tratamento de biometano [6-5].



Figura 6.1: Controle de gás para sopramento de ar no gasômetro do biodigestor [DBFZ]

6.1.1.3 Lavagem bioquímica de gás - lavador biológico de gás

Ao contrário da técnica com filtro percolador e da dessulfurização interna, o lavador biológico de gás constitui o único processo biológico para o tratamento visando a qualidade de gás natural. O sistema de dois estágios é composto de uma coluna de lavagem recheada (absorção do H_2S por meio de solução de soda cáustica diluída), um biodigestor (regeneração da solução de lavagem com oxigênio do ar) e um separador de enxofre (remoção do enxofre elementar). Por meio da regeneração separada, evita-se a injeção de ar no biogás. Embora essa tecnologia permita a eliminação de grandes cargas de enxofre (até 30.000 mg/m^3), com resultados semelhantes aos do filtro percolador, ela só é indicada para usinas com grandes vazões de gás ou elevadas cargas de H_2S em função da alta complexidade do equipamento exigido. As propriedades são mostradas na tabela 6.4.

6.1.1.4 Precipitação de sulfeto

Esta forma de dessulfurização química é realizada no biodigestor. Assim como o processo de biodessulfurização, ela permite a dessulfurização grossa (propicia valores de H_2S entre 100 e 150 ppm [6-35]). Pela adição ao biodigestor dos compostos de ferro citados na tabela 6.5, o enxofre é ligado quimicamente ao substrato de fermentação, o que permite suprimir a liberação de sulfeto de hidrogênio. Em função das propriedades mostradas na tabela 6.5, esse método é indicado principalmente para usinas de menor porte ou usinas com baixa carga de H_2S ($< 500 \text{ ppm}$) [6-35].

Tabela 6.3: Valores característicos e parâmetros operacionais de equipamentos externos de biodessulfurização

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • capacidade de purificação superior a 99% (p. ex. de 6.000 ppm a < 50 ppm) • disponível para todas as dimensões de usinas de biogás
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os sistemas de geração de biogás • dessulfurização grossa • coluna de filtro percolador não adequada para alimentação
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + permite dimensionamento para a quantidade real liberada de sulfeto de hidrogênio + permite otimização automatizada da remoção do sulfeto de hidrogênio pelo manejo de nutrientes, temperatura e alimentação de ar + o processo não é prejudicado pela injeção de oxigênio no biodigestor (pois a injeção de ar se dá fora do digestor) + não exige o uso de produtos químicos + a tecnologia permite fácil ampliação + quando em tamanho suficientemente grande, oscilações momentâneas da quantidade de gás não afetam negativamente a qualidade do gás
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - unidade adicional com custos associados (temperatura ótima do filtro percolador de 28 – 32 °C) - manutenção extra necessária (disponibilização de nutrientes) - filtro percolador com injeção de ar no biogás muito elevada
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • equipamentos de dessulfurização externos
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • separado, como coluna, caldeira ou container de plástico ou aço inoxidável, recheado com meio filtrante, por vezes com retrolavagem de emulsão de microrganismos (filtro percolador)
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • em alguns casos, as emulsões biológicas de microrganismos têm de ser renovadas em intervalos regulares, o que exige a troca do meio filtrante no longo prazo

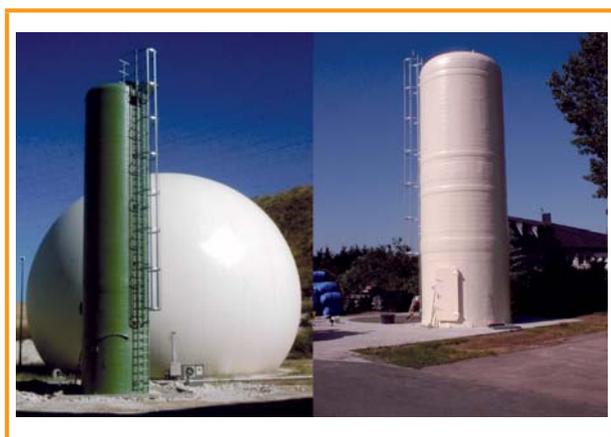


Figura 6.2: Coluna de biodessulfurização externa, à direita ao lado de um gasômetro [S&H GmbH & Co. Umweltengineering KG]

6.1.1.5 Adsorção em carvão ativado

A adsorção em carvão ativado utilizada como método de dessulfurização fina se baseia na oxidação catalítica do sulfeto de hidrogênio na superfície do carvão ativado. É possível impregnar ou dopar o carvão ativado para aumentar a velocidade da reação e melhorar a capacidade de carga. O iodeto de potássio e o carbonato de potássio são compostos que podem ser usados como meio de impregnação. A dessulfurização adequada exige a presença de vapor e oxigênio. O carvão ativado impregnado, portanto, não é indicado para a utilização

com gases isentos de ar. No entanto, o carvão ativado dopado com permanganato de potássio, lançado recentemente no mercado, pode ser utilizado também para biogás isento de ar. Nesse caso também é melhorado o grau de dessulfurização, uma vez que ocorre o bloqueio dos microporos [6-35].

6.1.2 Secagem

O vapor d'água deve ser removido do biogás a fim de proteger os componentes de processamento de gás contra desgaste e danos, e para atender às exigências dos estágios de purificação seguintes. A quantidade de água e vapor d'água que o biogás pode absorver depende da sua temperatura. No biodigestor, a umidade relativa do biogás é de 100% (completamente saturado). A retirada de água do biogás se dá pela secagem por condensação, secagem por adsorção (gel de sílica, carvão ativado) e secagem por absorção (desidratação por glicol). Esses processos são explicados resumidamente a seguir.

6.1.2.1 Secagem por condensação

Este processo se baseia no princípio da separação do condensado pelo resfriamento do biogás abaixo do ponto de orvalho. O resfriamento do biogás é frequentemente realizado na tubulação de gás. Se a tubulação for instalada com uma certa inclinação, o condensado é

Tabela 6.4: Valores característicos e parâmetros operacionais da lavagem bioquímica externa de gás

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • pode ser realizada com solução de soda cáustica ou com hidróxido de ferro • sistemas disponíveis para fluxos de gás entre 10 e 1.200 Nm³/h • conforme a relação entre a quantidade de gás bruto e o tamanho da usina, permite graus de purificação muito elevados, acima de 95%
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os sistemas de geração de biogás • dessulfurização grossa
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + permite dimensionamento para a quantidade real liberada de sulfeto de hidrogênio + permite a otimização automatizada e seletiva da separação do sulfeto de hidrogênio pelo manejo da temperatura e da solução + a injeção de oxigênio não prejudica o processo + evita forte corrosão dos componentes no gasômetro do biodigestor (em comparação com a dessulfurização biológica interna)
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - componente adicional com custos associados (solução de soda cáustica, água fresca) - exige produtos químicos - exige a introdução de água fresca para dissolver a solução (desnecessário no caso de hidróxido de ferro) - manutenção extra necessária
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • exige que a solução consumida seja eliminada em estações de tratamento; não problemático do ponto de vista químico (somente no caso de solução de soda cáustica) • equipamento de dessulfurização externo
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • colunas ou caldeiras de plástico, separadas, recheadas com meio filtrante, com retrolavagem da solução de soda cáustica
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • os produtos químicos devem ser repostos em intervalos maiores • o hidróxido de ferro pode ser regenerado repetidas vezes com ar ambiente, porém com risco de ignição pela forte liberação de calor

Tabela 6.5: Valores característicos da dessulfurização química interna; conforme [6-13]

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • para a separação, podem ser utilizadas substâncias químicas como sais de ferro (cloreto férrico, cloreto ferroso, sulfato ferroso) na forma líquida ou sólida; o ferro dos pântanos também é adequado • valor de referência conforme [6-20]: adição de 33 g Fe por m³ de substrato
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os sistemas de digestão úmida • dessulfurização grossa
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + ótimas taxas de remoção + não exige equipamento adicional para dessulfurização + não requer manutenção extra + permite a dosagem com base na massa de substrato introduzida + a injeção de oxigênio não prejudica o processo + evita forte corrosão dos componentes no gasômetro do biodigestor (em comparação com a biodessulfurização interna) + oscilações da taxa de liberação de gás não provocam quedas na qualidade do biogás + processo apropriado para a injeção de biogás com dessulfurização fina a jusante
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - difícil dimensionamento com base no teor de enxofre do substrato carregado (superdosagem normalmente necessária) - custos fixos mais elevados em função do consumo contínuo de produtos químicos - maiores custos de investimento devido às abrangentes medidas de segurança
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • a dessulfurização química no biodigestor é em certos casos utilizada quando a biodessulfurização no gasômetro do biodigestor não é suficiente • o sulfeto de ferro originado pode causar a drástica elevação da concentração de ferro no solo após a aplicação na lavoura
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • dosagem manual ou automática por equipamento adicional para transporte em pequena escala • pode ser introduzido como solução ou na forma de pellets e grãos
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • nenhuma ou muito pouca manutenção necessária

Tabela 6.6: Valores característicos da dessulfurização com carvão ativado

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • uso de carvão ativado impregnado (iodeto de potássio, carbonato de potássio) ou dopado (permanganato de potássio)
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • todos os sistemas de geração de biogás • para a dessulfurização fina em concentrações de 150 a 300 ppm
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + ótimas taxas de dessulfurização (valores < 4 ppm possíveis [6-25]) + custos de investimento moderados + com o uso de carvão ativado dopado, a injeção de oxigênio não tem impacto negativo sobre o processo + evita forte corrosão dos componentes no gasômetro do biodigestor (em comparação com a biodessulfurização interna) + técnica adequada para a injeção de biogás
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - não apropriado para biogases sem oxigênio e vapor d'água (exceção: carvão ativado impregnado) - a regeneração é onerosa e implica elevados custos operacionais (vapor d'água com temperaturas acima de 450 °C [6-4]) - eliminação do carvão ativado - não é possível aproveitar o enxofre extraído
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • a dessulfurização com carvão ativado é usada quando se necessita de gases com teores de enxofre especialmente baixos
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • como coluna de plástico ou aço inoxidável, separada, recheada com carvão ativado
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • exige a troca regular do carvão ativado

recolhido em um purgador de vapor, localizado no ponto mais baixo da tubulação. Em tubulações enterradas, o resfriamento é ainda maior. Para que o biogás possa ser resfriado, porém, é necessário que a tubulação de gás seja suficientemente longa. Além do vapor contido no condensado, do biogás também são eliminadas substâncias como gases solúveis em água e aerossóis. O acesso aos purgadores de vapor deve ser facilitado, uma vez que têm de ser esvaziados regularmente. A instalação dos purgadores de vapor deve ser obrigatoriamente à prova de congelamento. O resfriamento adicional pode ser obtido por meio da transferência de frio por água fria. Conforme [6-35], esse método permite pontos de orvalho de 3 - 5 °C e a redução do conteúdo de vapor d'água para até 0,15% em volume (teor original: 3,1% em volume, 30 °C, pressão do meio). Se o gás for comprimido previamente, a extração do condensado é ainda mais eficiente. O processo representa o estado da técnica para a subsequente combustão de gases, mas não atinge os padrões das folhas de processo G260 e G262 da DVGW, satisfazendo apenas em parte os critérios para a injeção de gás na rede de distribuição. Processos de purificação por adsorção instalados a jusante (adsorção com modulação de pressão, dessulfurização adsortiva) podem auxiliar na secagem [6-35]. A secagem por condensação é indicada para qualquer fluxo volumétrico.

6.1.2.2 Secagem por adsorção

Os processos de secagem por adsorção, os quais utilizam zeólitos, gel de sílica ou óxido de alumínio, dão resultados significativamente melhores. Nesses processos, é possível atingir pontos de orvalho de até -90 °C [6-22]. Instalados em um leito fixo, os adsorvedores são operados alternadamente a uma pressão ambiente de 6 - 10 bar e se destinam a fluxos volumétricos pequenos a médios [6-35]. Os materiais de adsorção podem ser regenerados a quente ou a frio. Maiores informações sobre as medidas de regeneração se encontram em [6-22] ou [6-35]. Graças aos ótimos resultados proporcionados, esse processo se destina a qualquer tipo de uso do biogás.

6.1.2.3 Secagem por absorção

A desidratação por glicol, utilizada originalmente no tratamento de gás natural, é um processo físico de absorção em que o biogás flui em uma torre absorvedora em contracorrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol. São removidos do biogás bruto tanto o vapor como os hidrocarbonetos superiores. Na desidratação por glicol, a regeneração se dá pelo aquecimento da solução de lavagem a 200 °C, que provoca a vaporização dos materiais estranhos [6-37]. Segundo a literatura, é possível atingir um ponto de orvalho de -100 °C [6-30]. Em termos econômicos, essa técnica é indicada para fluxos mais elevados (500 m³/h) [6-5] e

Tabela 6.7: Comparação entre os métodos de purificação do metano [6-5], [6-35]

Processo	Princípio de ação/características	Teor de CH ₄ possível	Dados
Adsorção com modulação de pressão (PSA)	Adsorção e dessorção físicas e alternadas por modulação de pressão	> 97 %	Grande número de projetos realizados, exige a dessulfurização e secagem prévias, equipamento permite baixo grau de regulagem, elevado consumo de eletricidade, não exige calor, escape de metano elevado, não utiliza produtos químicos
Lavagem com água sob pressão	Absorção física com água como solvente; regeneração por redução da pressão	> 98 %	Grande número de projetos realizados, exige dessulfurização e secagem a montante, adapta-se ao fluxo volumétrico de gás, elevado consumo de eletricidade, não exige calor, escape de metano elevado, não utiliza produtos químicos
Tratamento com aminas	Absorção química por meio de soluções aquosas de aminas, regeneração por vapor d'água	> 99 %	Alguns projetos realizados, indicado para pequenos fluxos de gás, baixo consumo de eletricidade (processo despressurizado), exige muito calor, escape de metano mínimo, utiliza grande quantidade de solução de lavagem
Lavagem Genosorb	Análoga à lavagem com água sob pressão, com Genosorb (ou Selexol) como solvente	> 96 %	Poucos projetos realizados, proporciona economia em grandes usinas, não exige dessulfurização e secagem a montante, adaptação flexível ao fluxo volumétrico de gás, elevado consumo de eletricidade, exige pouco calor, escape de metano elevado
Processo de separação por membranas	Gradiente de pressão em membranas porosas para separação de gás; ou velocidade de difusão de gases	> 96 %	Poucos projetos realizados, exige dessulfurização e secagem prévias, elevado consumo elétrico, não exige calor, escape de metano elevado, não utiliza produtos químicos
Processo criogênico	Liquefação de gases por retificação, separação em temperaturas criogênicas	> 98 %	Projeto-piloto, exige dessulfurização e secagem prévias, grande consumo de energia elétrica, escape de metano muito reduzido, não utiliza produtos químicos

possibilita a injeção de biogás na rede de distribuição como opção de uso.

6.1.3 Remoção do dióxido de carbono

A etapa de remoção do dióxido de carbono é necessária sobretudo quando o objetivo é injetar o gás na rede de gás natural. Com o aumento do teor de metano, é possível ajustar as propriedades comburentes aos padrões previstos na folha de processo da DVGW. Desde 2006, na Alemanha entraram em operação 38 usinas que produzem biogás tratado para a injeção na rede de gás natural. Tanto na Alemanha como nos demais países europeus, os processos de tratamento mais utilizados são a lavagem com água sob pressão e os equipamentos de adsorção com modulação de pressão, seguidos pela lavagem química. Os fatores determinantes na escolha do processo são a composição do gás, a qualidade do produto que se pode obter, as perdas de metano e os custos de tratamento, variáveis conforme a situação local. A tabela 6.7 apresenta um resumo das principais propriedades dos processos de tratamento, explicados mais detalhadamente nas seções seguintes.

6.1.3.1 Adsorção com modulação de pressão (PSA)

O uso de carvão ativado, peneiras moleculares (zeólitos) e peneiras moleculares de carbono para a separação física de gás constitui a técnica de adsorção com modulação de pressão (PSA: Pressure Swing Adsorption). Amplamente utilizado, essa tecnologia representa o atual estado da técnica, tendo sido adotada em inúmeros projetos sobretudo na Alemanha. Em sistemas de tratamento de biogás, são utilizados quatro a seis adsorvedores conectados paralelamente, dependendo da duração de cada um dos quatro ciclos do processo: adsorção (recepção do vapor de H₂O e CO₂ a uma pressão de aprox. 6 a 10 bar), dessorção (pela despressurização), evacuação (dessorção subsequente pela aplicação de gás bruto ou tratado) e pressurização. Essa configuração de equipamento proporciona concentrações de CH₄ de cerca de 97% em volume. O rendimento de metano pode ser elevado, com custo adicional, pela introdução de mais ciclos de aplicação de gás tratado/bruto e pela recirculação parcial do gás de exaustão do compressor. Se o sistema for utilizado adequadamente, os intervalos de manutenção dos adsorventes são praticamente infinitos, desde que o gás

bruto não contenha enxofre e seja seco. Caso contrário, água, sulfeto de hidrogênio e eventualmente outros componentes secundários seriam adsorvidos nas peneiras moleculares de carbono, reduzindo permanentemente a capacidade de separação da PSA ou até mesmo causando a sua parada. Em comparação com os demais processos, a energia total consumida é relativamente baixa, embora a demanda de eletricidade seja relativamente alta em função da alternância da pressão. Outra vantagem é a vocação desse processo para aplicações da pequena escala. A desvantagem da PSA são as perdas de metano relativamente altas no fluxo de exaustão (aprox. 1 - 5%). Em vista de o metano ser um importante gás do efeito estufa, tem de ser submetido à pós-combustão.

6.1.3.2 Lavagem com água sob pressão

A lavagem com água sob pressão é o processo mais utilizado para o tratamento de biogás na Europa, estando presente em cerca de metade das usinas. Ela tira proveito das diferentes solubilidades em água do CH_4 e do CO_2 . O biogás pré-tratado (separação das gotículas de água e névoa eventualmente transportadas do digestor com o gás por um filtro de cascalho) é primeiro comprimido a cerca de 3 bar, e subsequentemente a cerca de 9 bar, antes de passar em contracorrente pela torre absorvedora carregada de H_2O (reator com filtro percolador) [6-5]. Na torre, o sulfeto de hidrogênio, o dióxido de carbono e a amônia se dissolvem na água, bem como as partículas e microrganismos eventualmente presentes no gás bruto. Após a redução da pressão d'água, essas substâncias são removidas do sistema. Esse processo, que prescinde da dessulfurização e secagem a montante, tem também a vantagem de ser muito flexível. A pressão, a temperatura e também a capacidade do equipamento (ajustável entre 40% e 100% da capacidade prevista) podem ser reguladas conforme o teor de CO_2 do gás bruto [6-5]. Outros aspectos positivos são a operação contínua e automática, a fácil manutenção, a possibilidade de tratar gases saturados de vapor d'água (desde que com secagem subsequente), a confiabilidade comprovada na prática, a coabsorção de H_2S e NH_3 e o uso da água, um absorvente amplamente disponível, seguro e barato [6-5]. O processo tem como desvantagens o elevado consumo de eletricidade e uma taxa de escape de metano relativamente alta (aprox. 1%), exigindo a combustão posterior.

6.1.3.3 Lavagem química (aminas)

O tratamento com aminas é uma técnica de absorção química em que o biogás despressurizado entra em contato com uma solução de lavagem que absorve o dióxido de carbono. Os meios de lavagem normalmente utilizados para a separação do CO_2 são a monoetanolamina (MEA) (em processos de baixa pressão com a finalidade de extrair somente o CO_2) e a dietanolamina (DEA) (em processos de alta pressão sem regeneração). Para a remoção de CO_2 e H_2S , são utilizadas a metildietilamina (MDEA) ou a trietanolamina (TEA) [6-5]. Para recuperar o agente de lavagem, são instaladas fases de dessorção e regeneração a jusante da fase de absorção. Na recuperação, é utilizado normalmente o vapor d'água. Isso exige uma elevada quantidade de energia térmica, o que significa uma grande desvantagem desse processo. O grande potencial de otimização dessa tecnologia, portanto, reside no uso de técnicas sofisticadas de utilização do calor. Além disso, o consumo contínuo de solvente pela regeneração incompleta é uma desvantagem notável. Por outro lado, o tratamento de gás com aminas tem a vantagem de proporcionar ótima qualidade ao gás tratado (> 99 %) e um escape de metano muito reduzido (< 0,1 %). No passado, essa técnica era pouco usada na Alemanha e demais países europeus. Hoje em dia, o número de estações de tratamento com aminas vem crescendo, sobretudo na Alemanha. O tratamento com aminas é usado preferencialmente para fluxos volumétricos menores e em locais com fontes de calor baratas.

6.1.3.4 Lavagens físicas (Selexol, Genosorb)

Sendo uma evolução do processo Selexol, o processo Genosorb se realiza sob o mesmo princípio da lavagem com água sob pressão. Em lugar da água, esse processo utiliza uma solução de lavagem (Genosorb) a 7 bar, que em contato com o biogás remove o dióxido de carbono, o sulfeto de hidrogênio e também a água. A lavagem Genosorb, portanto, é o único método que permite a remoção desses três componentes em um só passo. Por razões econômicas, porém, deve ser utilizado biogás seco e dessulfurizado. A solução de lavagem é regenerada por despressurização gradual a 50 °C, seguida do jateamento com ar ambiente. Conforme [6-35], o fornecimento do calor necessário pode ser auxiliado pela extração de calor residual do compressor de gás. Segundo o fabricante, o escape de metano é de 1% a 2%, o qual deve ser submetido à oxidação térmica. Do ponto de vista energético, esse



Figura 6.3: Estação de tratamento de biogás (lavagem Genosorb) em Ronnenberg [Urban, Fraunhofer UMSICHT]

processo exigem uma quantidade de energia ligeiramente superior à utilizada na lavagem com água sob pressão e na adsorção com modulação de pressão [6-35].

6.1.3.5 Processo de membrana

O processo de separação por membranas é relativamente novo na área de tratamento de biogás e ainda se encontra em desenvolvimento. Ele já vem sendo utilizado por algumas usinas (município alemão de Kisllegg-Rahmhaus e na Áustria). O processo de membrana realiza a separação do metano e demais componentes do gás com base nas diferentes velocidades de difusão que as diferentes moléculas de gás apresentam em função do seu tamanho. Por causa do seu tamanho reduzido, a molécula de metano se difunde mais rapidamente pela maioria das membranas que o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio. A pureza do gás pode ser ajustada pelo tipo de membrana, a superfície da membrana, a velocidade do fluxo e o número de estágios de separação.

6.1.3.6 Separação criogênica

O tratamento criogênico de gás (separação do CH_4 e do CO_2 a temperaturas muito baixas) abrange a retificação (liquefação de gases), que origina o CO_2 líquido, e a separação a temperaturas baixas, que ocasiona o congelamento do CO_2 [6-5]. Ambos os processos são bastante complexos e exigem a prévia dessulfurização e secagem do gás. Especialmente em aplicações de biogás, esses processos não foram testados na prática. O maior problema é o elevado consumo de energia. A alta qualidade do gás que se pode obter (> 99 %) e as pequenas perdas de metano (< 0,1 %), porém, justificam o aprimoramento futuro dessa tecnologia.

6.1.4 Separação do oxigênio

A separação do oxigênio do biogás bruto tem importância para a injeção do biometano na rede de gás natural. Além das normas e recomendações técnicas da DVWG, respeitar também os tratados internacionais. Os processos de tratamento que melhor se estabeleceram foram a separação por catalisadores de platina e

paládio e a sorção química em contatos de cobre. Maiores informações se encontram em [6-35].

6.1.5 Separação de outros gases traço

Entre os gases traço do biogás contam-se a amônia, os siloxanos e o BTX (benzeno, tolueno e xileno), entre outros. Em usinas de biogás agrícolas, no entanto, essas substâncias comumente não ocorrem. De forma geral, as suas concentrações se situam abaixo dos requisitos das normas e recomendações técnicas da DVGW [6-35], sendo essas substâncias raramente detectadas. Além disso, essas substâncias também são eliminadas nos citados processos de dessulfurização, secagem e purificação do metano.

6.1.6 Tratamento visando qualidade de gás natural

Após passar por todos os estágios de purificação, o biogás produzido com o objetivo de ser injetado na rede de distribuição tem de ser submetido a um ajuste final para que se atinja o padrão de qualidade do gás natural. Ainda que esse padrão seja dependente do gás natural existente, para o produtor de biogás o único fator relevante é o cumprimento das folhas de processo da DVGW G 260 e G 262. A distribuidora de gás é responsável pelo ajuste fino da qualidade do gás, bem como pelos custos fixos operacionais (consulte o capítulo 7.4.3 para maiores informações). Nesse sentido, devem ser considerados os pontos descritos a seguir.

6.1.6.1 Odorização

O biometano deve ser continuamente odorizado para que possa ser sentido em caso de vazamentos. Os odorantes comumente utilizados são o mercaptano, o tetratrotiofeno (THT) ou compostos orgânicos contendo enxofre. Por razões técnicas e ambientais, porém, os últimos anos têm registrado uma tendência no uso de odorantes sem enxofre. A aplicação do odorante pode ser por injeção ou por um sistema de bypass. As especificações detalhadas sobre a monitoração da odorização se encontram na folha de processo da DVGW G 280-1.

6.1.6.2 Ajuste do poder calorífico superior

As propriedades comburentes do biometano injetado e do gás natural existente devem ser equivalentes. Como base de comparação, são utilizados o poder

calorífico superior, a densidade relativa e o índice de Wobbe. Esses valores devem se situar nas faixas de variação permitidas, sendo que a densidade relativa e o índice de Wobbe podem ser excedidos ou reduzidos temporariamente. As respectivas especificações se encontram nas folhas de processo da DVGW G260 e G685. O ajuste desses parâmetros pode ocorrer pela adição de ar (biogás com poder calorífico superior muito elevado), ou de GLP (biogás com poder calorífico superior muito baixo), que é geralmente uma mistura de propano e butano. A quantidade de GLP adicionada é limitada, por um lado, pelo risco de re-liquefação em equipamentos de alta pressão conectados à rede de distribuição (reservatórios, postos de abastecimento de GNV) e, por outro lado, pelas determinações da folha de processo da DVGW G486. Em virtude dos limites do procedimento matemático aplicado para a conversão de massas, as quantidades máximas de mistura de propano e butano se limitam respectivamente a 5 e 1,5 mol%.

6.1.6.3 Ajuste da pressão

A injeção do biometano nos diferentes níveis da rede de distribuição exige que ele esteja a uma pressão ligeiramente superior à da rede. Os diferentes níveis de injeção são as redes de baixa pressão (< 0,1 bar), média pressão (0,1 a 1 bar) e alta pressão (a partir de 1 bar). As chamadas redes de máxima pressão são aquelas com pressões acima de 16 bar [6-5]. Para comprimir o biogás, normalmente são utilizados compressores de pistão e de parafuso. Observar que em muitos processos (PSA, lavagem com água sob pressão) o biogás tratado já sai com a pressão operacional de 5 a 10 bar, dispensando uma estação de compressão adicional conforme a pressão da rede.

6.2 Uso em usinas de cogeração

A cogeração (CHP) é a geração simultânea de eletricidade e calor. Conforme as suas características, as usinas de cogeração se dividem em dois tipos: aquelas que produzem principalmente calor e aquelas com ênfase na produção de eletricidade. A variante para a produção prioritária de calor é preferível em função da sua maior eficiência. Na maioria dos casos, são utilizadas usinas de cogeração com motores de combustão acoplados a um gerador. Os motores operam a uma rotação constante de forma que o gerador acoplado possa fornecer energia elétrica compatível com a frequência da rede. Para acionar o gerador ou gerar

eletricidade, pode-se utilizar também microturbinas a gás, motores Stirling ou células de combustível como alternativas aos motores do ciclo Diesel (ignição por compressão) ou ciclo Otto (ignição por centelha).

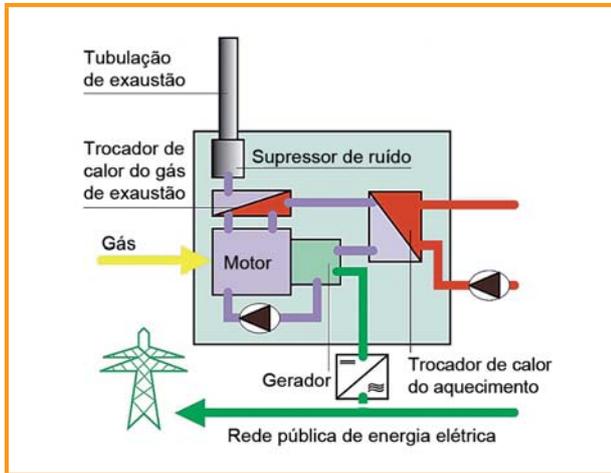


Figura 6.4: Estrutura esquemática de uma usina de cogeração [ASUE]



Figura 6.5: Usina de cogeração com biogás, módulo completo em construção compacta com sistema de queima em flare [Haase Energietechnik AG]

6.2.1 Usinas de cogeração com motores de combustão

Além do motor de combustão e gerador compatível, o módulo de cogeração é composto de trocadores de calor para a recuperação da energia térmica do gás de combustão, circuito de arrefecimento e óleo lubrifi-

cante, dispositivos hidráulicos para a distribuição de calor e dispositivos elétricos de controle e comutação para distribuir a energia e controlar a usina. São utilizados motores tanto do ciclo Otto quanto do ciclo Diesel. O uso de motores do ciclo Diesel era mais comum no passado. Em projetos novos, porém, duas em cada três usinas são equipadas com motores do ciclo Otto. Esses motores funcionam sem óleo de ignição conforme o princípio do ciclo Otto, sendo a diferença apenas na compressão. O esquema construtivo de uma usina de cogeração a biogás e exemplos se encontram na figuras 6.4 e 6.5.

6.2.1.1 Motores a gás de ciclo Otto

Os motores a gás de ciclo Otto foram especialmente desenvolvidos para operar a gás e funcionam sob o princípio dos motores Otto. Para permitir a redução das emissões de óxidos de nitrogênio, eles são operados como motores de mistura pobre com excesso de ar. Na operação com mistura pobre, uma quantidade menor de combustível é convertida no motor, ocasionando a queda do seu desempenho, a qual é compensada pela ação de turbocompressores. Motores a gás do ciclo Otto exigem um teor de metano mínimo de 45% no biogás. Teores de metano inferiores resultam na parada do motor.

Caso não haja biogás disponível, os motores a gás do ciclo Otto podem ser operados com outros tipos de gás, tais como o gás natural [6-12]. Isso pode ser útil, por exemplo, para dar a partida em uma usina de biogás a fim de que o motor proporcione o calor necessário para o processo. Além da linha do biogás, o sistema deve contar também com uma linha para o gás alternativo.

Os principais dados característicos dos motores a gás do ciclo Otto relevantes para aplicações com biogás são mostrados na tabela 6.8.

6.2.1.2 Motores com ignição a compressão

Os motores com ignição a compressão trabalham sob o princípio do motor a Diesel. Nem sempre são utilizados motores especialmente desenvolvidos para a combustão de gás, o que exige que sejam adaptados. O biogás é misturado ao ar de combustão por meio de um misturador de gás e a sua ignição se dá pelo óleo de ignição injetado na câmara de combustão. A dosagem é ajustada de forma que a fração de óleo de ignição seja de aprox. 2% - 5% do poder de combustão introduzido. Como a quantidade de óleo de ignição injetado é relativamente pequena, existe o risco de



Tabela 6.8: Valores característicos e parâmetros operacionais de motores a gás do ciclo Otto

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • potência elétrica até > 1 MW, raramente abaixo de 100 kW • eficiência elétrica 34% - 42% (para potências nominais > 300 kW) • vida útil: aprox. 60.000 horas de operação • pode ser utilizado com teores de metano a partir de aprox. 45%
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • a princípio em qualquer usina de biogás; aplicação comercial mais provável em usinas de maior porte
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + construído especialmente para o uso com gás + os limites de emissões são respeitados ao máximo (possibilidade de exceder os limites de formaldeído) + exige pouca manutenção + eficiência total superior à de motores com ignição a compressão
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - investimento ligeiramente superior ao do motor com ignição a compressão - maiores custos devidos à fabricação em escala mais reduzida - eficiência elétrica menor à de motores com ignição à compressão em faixas inferiores de potência
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • exige um radiador de emergência para evitar superaquecimento em situações de pouca demanda de calor • controle de potência em dependência da qualidade do gás é possível e recomendável
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • como equipamento separado e independente instalado em edifício ou em construção compacta em container
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • ver capítulo "Manutenção"

Tabela 6.9: Valores característicos e parâmetros operacionais de motores com ignição a compressão

Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> • 2% - 5% de óleo de ignição para combustão • potência elétrica até aprox. 340 kW • vida útil: aprox. 35.000 horas de operação • eficiências elétricas 30% - 44% (eficiência em torno de 30% somente em usinas pequenas)
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • a princípio todas as usinas de biogás; aplicação comercial somente em usinas menores
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + uso de motores comuns a baixo custo + eficiência elétrica maior em comparação com motores a gás do ciclo Otto em faixas inferiores de potência
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - a carbonização dos bicos injetores ocasiona a elevação das emissões de gases de exaustão (NO_x) e manutenção mais frequente - não existem motores desenvolvidos especificamente para o biogás - eficiência total menor que a de motores a gás do ciclo Otto - exige o uso de um combustível adicional (óleo de ignição) - a emissão de poluentes frequentemente excede os valores-limite da TA Luft - vida útil curta
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> • exige um radiador de emergência para evitar superaquecimento em situações de pouca demanda de calor • Controle de potência em dependência da qualidade do gás é possível e recomendável
Formas construtivas	<ul style="list-style-type: none"> • como equipamento separado e independente instalado em edifício ou em construção compacta em container
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • ver capítulo "Manutenção"

carbonização e obstrução precoce dos bicos injetores [6-12], uma vez que eles não são refrigerados. Os motores com ignição a compressão também são operados com mistura pobre. A regulação da carga se dá pela quantidade de óleo de ignição ou de gás.

Em caso de indisponibilidade do biogás, os motores com ignição a compressão podem ser operados com óleo de ignição puro ou diesel. A mudança para um combustível alternativo se dá sem contratempos e

pode ser necessária para fornecer calor ao processo durante a partida da usina de biogás.

Conforme a EEG, somente podem ser utilizados óleos de ignição regenerativos como o metil-éster de canola ou outras biomassas reconhecidas. O uso desses óleos, no entanto, deve respeitar as exigências mínimas de qualidade dos fabricantes de motores. Os valores característicos e os parâmetros operacionais de motores com ignição a compressão se encontram na tabela 6.9.

Tabela 6.10: Limites de emissões da TA Luft de 30.07.2002 para motores de combustão conforme N^o 1.4 (inclusive 1.1 e 1.2), 4^o Regulamento Alemão de Proteção contra Emissões [6-16]

Poluente	Unidade	Motores a gás de ciclo Otto		motores com ignição a compressão	
		Potência térmica nominal			
		< 3 MW	≥ 3 MW	< 3 MW	≥ 3 MW
Monóxido de carbono	mg/m ³	1.000	650	2.000	650
Óxido de nitrogênio	mg/m ³	500	500	1.000	500
Dióxido de enxofre e trióxido de enxofre indicados como dióxido de enxofre	mg/m ³	350	350	350	350
Total de partículas	mg/m ³	20	20	20	20
Substâncias orgânicas: Formaldeído	mg/m ³	60	20	60	60

6.2.1.3 Redução de poluentes e tratamento dos gases de combustão

Conforme a Lei Alemã de Proteção contra Emissões (BImSchG), é necessária a autorização para operar motores de combustão estacionários destinados ao uso com biogás e com potência térmica nominal de 1 MW ou superior. A Diretriz Técnica Alemã para o Controle da Poluição Atmosférica (TA Luft) estipula valores-limite a serem respeitados. Se a potência térmica nominal instalada for inferior a 1 MW, o equipamento não necessita de autorização conforme a Lei Alemã de Proteção contra Emissões. Nesse caso, a inspeção do equipamento, a fim de verificar se a empresa operadora está em conformidade com as exigências, deve se basear nos limites prescritos pela TA Luft. Portanto, existe a obrigação de limitar ao mínimo o impacto sobre o meio ambiente conforme o estado da técnica, obrigação essa que é tratada de forma diferente pelas diversas autoridades [6-33]. Os valores-limite indicados na TA Luft distinguem motores com ignição a compressão de motores a gás do ciclo Otto. Na tabela 6.10 se encontram os valores-limite exigidos pela TA Luft conforme publicação de 30 de julho de 2002.

A disponibilidade de um gás combustível bem purificado pode minimizar os teores de poluentes do gás de combustão. Dióxido de enxofre ocorre, p. ex., na queima do sulfeto de hidrogênio (H₂S) contido no biogás. Se as concentrações de substâncias traço indesejadas no biogás forem pequenas, também serão pequenas as concentrações dos produtos provenientes da sua combustão.

São utilizados motores de mistura pobre para mitigar as emissões de óxido de nitrogênio. A combustão

com mistura pobre permite reduzir a temperatura de combustão e, com isso, a geração de óxidos de nitrogênio.

O uso de catalisadores não é comum em usinas de cogeração a biogás. As substâncias concomitantes contidas no biogás, tais como o sulfeto de hidrogênio, provocam a desativação e destruição dos catalisadores.

Motores de mistura pobre a gás do ciclo Otto normalmente operam na faixa de limites da TA Luft sem problemas. Em geral, os motores com ignição a compressão apresentam valores piores de emissões que os motores a gás do ciclo Otto. Particularmente as emissões de óxido de nitrogênio (NO_x) e de monóxido de carbono (CO) podem exceder os limites previstos na TA Luft sob determinadas circunstâncias. Em função do óleo utilizado para a ignição do motor, os gases de combustão contêm também partículas de fuligem [6-33], [6-7], [6-26]. Recentes estudos apontam para problemas na limitação das emissões de formaldeído [6-15]. Para cumprir os valores de emissões da TA Luft ou da EEG 2009 (40 mg/m³), existem sistemas de combustão posterior e filtros de carvão ativo. Seu uso, no entanto, ainda não está disseminado.

6.2.1.4 Geradores

Os geradores utilizados em usinas de cogeração são do tipo assíncronos ou síncronos. Por causa do elevado consumo de corrente reativa dos geradores assíncronos, recomenda-se que sejam utilizados em equipamentos com menos de 100 kW_{el} [6-27]. Por essa razão, normalmente as usinas de biogás são equipadas com geradores síncronos.

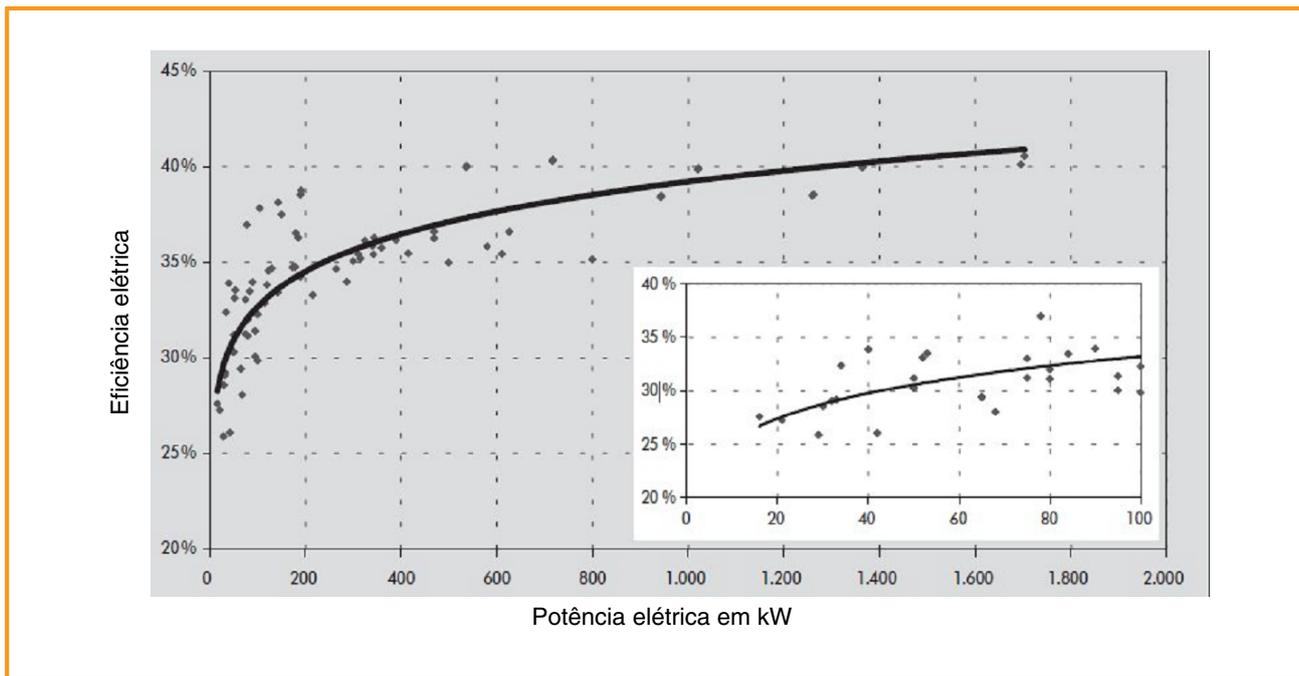


Figura 6.6: Eficiência elétrica de usinas de biogás para a cogeração [6-41]

6.2.1.5 Eficiência elétrica e potência

A eficiência de uma usina de cogeração mede o grau de aproveitamento da energia que a alimenta. A eficiência total se compõe das eficiências elétrica e térmica e se situa normalmente entre 80% e 90%. Em uma situação ideal, portanto, 90% da potência térmica nominal é aproveitada energeticamente.

A potência térmica nominal é calculada da seguinte forma:

$$\dot{Q}_F = (\dot{v}_B \cdot H_i)$$

Equação 6-1: Q_F = potência térmica nominal [kW];
 v_B = fluxo volumétrico de biogás [m^3/h];
 H_i = poder calorífico inferior do biogás [kWh/m^3]

Para motores do ciclo Otto e motores com ignição a compressão, assume-se empiricamente que a eficiência térmica e elétrica sejam respectivamente de 50% da eficiência total. A eficiência elétrica é o resultado da eficiência mecânica do motor multiplicada pela eficiência do gerador. A figura 6.6 mostra os valores de eficiência que podem ser atingidos.

A eficiência elétrica de usinas de cogeração operadas com motores com ignição a compressão é de 30% a 44%. Pelo menos na faixa inferior de potência, essa

eficiência é maior que a de usinas com motores do ciclo Otto com a mesma potência elétrica. A eficiência de usinas de cogeração operadas com motores a gás do ciclo Otto é de 34% a 42%. Com o aumento da potência elétrica, aumenta a eficiência do motor, seja ele com ignição a compressão ou do ciclo Otto. Como as eficiências indicadas pelos fabricantes de usinas são calculadas em condições controladas (operação contínua com gás natural), os valores obtidos na prática geralmente são menores. Observar principalmente que na prática apenas em casos excepcionais é possível a operação a plena carga, a qual apresenta eficiências maiores que aquelas em operação com carga parcial. Essa correlação é específica ao equipamento e pode ser obtida nas folhas de especificações técnicas.

Um grande número de fatores pode influenciar a eficiência elétrica, a capacidade e as emissões de gases poluentes de uma usina de cogeração. Principalmente os componentes do motor – tais como as velas, o óleo do motor, as válvulas e os pistões – e os filtros de ar, gás e óleo estão sujeitos ao desgaste pelo uso. A fim de aumentar a vida útil da usina de cogeração, esses componentes que sofrem desgaste devem ser substituídos em ciclos regulares. De modo geral, são indicados os ciclos de manutenção a cumprir fornecidos pelo fabricante da usina. Além disso, o ajuste de parâmetros da usina como o fator lambda, o momento da ignição e a folga da válvula influenciam significativamente a eficiência elétrica e a potência, e também a quantidade de poluen-

tes emitidos. A execução da manutenção e ajuste é de responsabilidade do operador da usina. Isso pode ser realizado pelo próprio administrador ou ser terceirizado por meio de contrato com o fabricante da usina de cogeração, ou com firmas especializadas, que disponibilizam equipes de manutenção especialmente para esse serviço. De modo geral, observa-se que a configuração da usina para que opere dentro das faixas estipuladas pela TA Luft tem um impacto importante sobre a qualidade da combustão, a potência elétrica e a eficiência elétrica [5-26].

6.2.1.6 Recuperação do calor

Para utilizar o calor produzido durante a geração de eletricidade, é necessário recuperá-lo por meio de trocadores de calor. Em uma usina de cogeração movimentada por um motor de combustão, o calor é produzido em diferentes patamares de temperatura. A maior quantidade de calor pode ser extraída por meio do sistema de arrefecimento do motor a combustão. O seu patamar de temperatura é suficiente para que seja utilizado como energia para aquecimento e processos. A figura 6.7 exibe um distribuidor de calor. Para recuperar o calor do sistema de circulação de água, geralmente são utilizados trocadores de calor de placas. O calor recuperado é em seguida transferido para cada um dos circuitos de calor por meio de distribuidores.



Figura 6.7: Distribuidor de calor [MT-Energie-GmbH]

A temperatura dos gases de combustão é de cerca de 460 a 550 °C. Para recuperar o seu calor, são usados trocadores de calor de gases de combustão confeccionados em aço inoxidável, geralmente sob a forma de trocadores de calor casco e tubos [6-13]. Os meios de

transferência térmica tipicamente em uso são o vapor a diferentes pressões, água quente e óleo térmico.

A demanda própria de calor pode ser facilmente suprida pelo calor produzido pela usina de cogeração. Normalmente, a demanda é maior apenas no inverno. No verão, por outro lado, o radiador de emergência tem de retirar a maior parte do calor excessivo, a não ser que o calor possa ser aproveitado externamente. Além do calor necessário para aquecer o biodigestor, que representa aprox. 20% a 40% do total de calor produzido, pode-se também aproveitá-lo para aquecer dependências da empresa e residências, por exemplo. As usinas de cogeração são totalmente compatíveis com a tecnologia comum de aquecimento e, portanto, podem facilmente ser conectadas ao circuito de aquecimento. Para o caso de paradas da usina de cogeração, deve ser colocada uma caldeira para a operação de emergência, equipamento que normalmente já existe na usina.

Além de outros consumidores de calor internos (p. ex. aquecedor de estábulo, refrigerador de leite), o fornecimento de calor para fora da empresa pode ser rentável. Em vista dos crescentes preços das biomassas dedicadas utilizadas como substrato, a venda de calor pode ser decisiva na lucratividade da usina. Isso é favorecido pelo bônus de geração distribuída de energia, previsto na Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG). Usinas já em funcionamento recebem 2 centavos de euro por kWh de energia elétrica produzida, desde que o aproveitamento do calor corresponda aos padrões da EEG de 2004. Para usinas novas, esse bônus é de 3 centavos de euro por kWh se o aproveitamento térmico se enquadrar na lista positiva da EEG de 2009. O mesmo se aplica a usinas existentes em conformidade com a EEG de 2009.

Caso o mercado ofereça boas oportunidades para a comercialização do calor, ele pode ser poupado pela melhoria do isolamento do biodigestor ou pela introdução otimizada do calor no digestor. Observar, porém, que a venda da energia térmica exige que o seu fornecimento seja contínuo, sem interrupções devidas a intervalos de manutenção e paradas na usina. Potenciais compradores da energia são empresas e instituições municipais localizadas nas proximidades da usina (empresas de horticultura, criadores de peixes, etc.) ou residências. Os processos de beneficiamento e secagem que exigem muita energia são uma oportunidade particularmente importante de aplicação da energia térmica. Outra opção é o uso em processos de trigeriação de energia – eletricidade, frio e calor (ver 6.2.5.2).

6.2.1.7 Linha de gás

O uso eficiente do biogás em motores a gás pressupõe que ele cumpra determinados requisitos quanto às propriedades físicas. As principais propriedades são a pressão com que o biogás é introduzido no motor (geralmente 100 mbar) e um fluxo volumétrico definido. Os motores operam a meia carga ou sofrem até mesmo a parada se esses parâmetros não corresponderem aos padrões, por exemplo se não for liberado gás suficiente no biodigestor. Para manter os valores constantes e cumprir os requisitos de segurança, uma linha de gás é instalada diretamente a montante da usina de cogeração.

A linha de gás e toda a sua tubulação devem ser licenciadas conforme as Diretrizes da Associação Técnico-Científica Alemã para Gás e Água (DVGW). Toda a tubulação de gás deve ser identificada em cor amarela ou com setas amarelas. A linha de gás deve ser dotada de duas válvulas de autofechamento (válvulas magnéticas), uma válvula de fechamento fora do local de instalação, um corta-chamas e um dispositivo de monitoramento de subpressão. Recomenda-se também que na linha sejam instalados um medidor de gás para a determinação da quantidade de gás e um filtro fino para a separação de partículas do biogás. Se necessário, instalar um compressor na linha. A figura 6.8 mostra um exemplo de linha de gás.

A instalação de equipamentos para a drenagem do condensado é particularmente importante em linhas de gás, uma vez que pequenas quantidades de condensado já são suficientes para ocasionar perdas da pressão de gás e interrupção do fluxo na tubulação.



Figura 6.8: Usina de cogeração com linha de gás [DBFZ]

6.2.1.8 Operação, manutenção e locais de instalação

O uso de biogás em usinas de cogeração exige que determinadas condições básicas sejam observadas e satisfeitas. Além da operação em si, também é necessário observar os intervalos de manutenção estipulados e os requisitos do local de instalação da usina de cogeração.

Operação

Graças a diversos recursos de monitoramento, regulação e controle, as usinas de cogeração em geral operam em regime totalmente automatizado. Para avaliar a operação da usina, os seguintes dados devem ser registrados em um diário de operações para que se identifiquem tendências:

- horas de operação acumuladas
- número de partidas
- temperatura da água do radiador do motor
- temperatura de fluxo e retorno da água de aquecimento
- pressão da água do radiador
- pressão do óleo
- temperatura do gás de combustão
- contrapressão do gás de combustão
- consumo de combustível
- potência efetiva (térmica e elétrica).

Via de regra, os dados podem ser registrados e documentados no controle da usina de cogeração. Com frequência é possível conectar o controle da usina de cogeração aos sistemas de controle da usina de biogás e realizar o intercâmbio de dados com um sistema de controle central, ou transmitir os dados via Internet, permitindo o diagnóstico remoto pelo fabricante. Além do uso de monitoramento eletrônico, porém, a inspeção diária da usina é indispensável. Em usinas de cogeração com motores de ignição a compressão, além do consumo de gás deve ser medido também o consumo do óleo de ignição.

Para determinar a eficiência térmica da usina de cogeração, além da quantidade de eletricidade produzida deve-se medir também a quantidade de calor produzido por meio de medidores adequados. Isso permite também determinar o calor de processo necessário ou o calor utilizado pelos demais consumidores conectados ao circuito de calor da usina de cogeração (tais como estábulos, etc.).

Para que os motores sejam suficientemente abastecidos com gás, deve-se garantir a respectiva pressão de fluxo antes que ele atinja a linha de gás. Em usinas onde se faz o armazenamento do gás sem pressão, é necessário elevar a pressão por um compressor.

O óleo lubrificante tem um papel fundamental para a operação segura de motores. É por meio dele que os ácidos originados no motor são neutralizados. Em função do desgaste, impurezas, nitrificação e perda da capacidade de neutralização, o óleo lubrificante deve ser trocado em intervalos regulares, conforme o tipo de motor, do óleo e o número de horas de operação. Além de trocar o óleo em intervalos regulares, deve-se retirar uma amostra de óleo visando a análise em um laboratório especializado. Os resultados do laboratório permitem determinar os intervalos de troca necessários e conhecer o desgaste do motor [6-12]. Em muitos casos, essas tarefas são cobertas por contratos de manutenção. Frequentemente são utilizados cárteres de maior capacidade de óleo, oferecidos por diversos fabricantes, a fim de prolongar os intervalos da troca de óleo.

Manutenção

A operação de uma usina de cogeração com biogás pressupõe que sejam cumpridos os intervalos de manutenção previstos. Parte desses serviços são as medidas de manutenção preventiva, tais como a troca de óleo e a substituição de peças de desgaste. A conservação e manutenção insuficientes podem ocasionar danos à usina de cogeração e acarretar elevados custos [6-12], [6-23].

Cada fabricante de usina de cogeração disponibiliza um plano de inspeção e manutenção. Com base nesse plano, é possível identificar que atividades são necessárias para a conservação dos módulos e em que intervalos de tempo elas devem ser realizadas. O período entre as diferentes medidas depende de fatores como o tipo de motor, por exemplo. Por meio de cursos de treinamento, oferecidos pelos fabricantes das usinas de cogeração, é possível realizar alguns trabalhos por conta própria [6-12].

Além dos planos de manutenção, são oferecidos também contratos de serviços. Os pormenores do contrato de serviços devem ser observados antes da compra da usina de cogeração. Considerar principalmente os seguintes pontos:

- que trabalhos serão realizados pelo operador
- que forma de contrato de serviços será acordada
- quem fornecerá os materiais operacionais
- qual será o período de vigência do contrato
- o contrato inclui uma grande inspeção
- como serão tratados os problemas não previstos.

As prestações incluídas no contrato de serviços depende, entre outros fatores, de que atividades são realizadas pelo próprio operador da usina. O grupo de especialistas em máquinas motrizes da Associação Alemã de Construção de Máquinas e Equipamentos

elaborou a especificação e o modelo de contrato para trabalhos de manutenção e conservação. Com base nessa especificação, teve origem a diretriz VDI 4680 "Fundamentos para a elaboração de contratos de serviços para usinas de cogeração". Nela podem ser encontradas as informações sobre o conteúdo e a estrutura dos contratos [6-2]. Conforme a VDMA, admitem-se diferentes formas de contrato de serviços.

O **contrato de inspeção** abrange todas as medidas para a determinação e avaliação do estado atual da usina a ser inspecionada. O pagamento pode ser na forma de taxa única ou calculado conforme o trabalho efetivo, e deve-se definir se haverá uma única inspeção ou se ocorrerão inspeções regulares.

O **contrato de manutenção** contém as medidas necessárias para a manutenção do estado-alvo. As atividades a executar devem ser incluídas em uma lista, a ser referida como parte integrante do contrato. As atividades devem ser periódicas ou realizadas conforme o estado da usina. As partes do contrato podem estipular que o pagamento seja na forma de uma taxa fixa ou pelo trabalho efetivamente realizado. Conforme o contrato, também é possível incluir nos serviços a eliminação de falhas que o operador não tem condições de sanar.

O **contrato de reparos** abrange todas as medidas necessárias para a restituição do estado-alvo. A definição das atividades a executar se dá com base nas condições de cada caso. O pagamento é normalmente calculado por trabalho efetivo [6-1].

O **contrato de conservação**, também chamado de contrato de manutenção completa, abrange as medidas necessárias para garantir a segurança da operação (trabalhos de manutenção e reparo, instalação de peças de substituição e reposição de insumos, excetuando-se o combustível). Ele inclui também a denominada revisão geral em função do seu período de vigência, normalmente de 10 anos. Esse contrato é o que mais se aproxima de uma garantia. O pagamento se realiza normalmente como taxa única [6-1].

A vida útil média de motores com ignição a compressão é de 35.000 horas de operação [6-28] [6-29]. Em um regime de 8.000 horas de operação por ano, isso representa cerca de 4,5 anos. Após esse tempo seria necessária uma revisão geral. Normalmente efetua-se a troca completa do motor, pois o seu baixo preço não justifica uma revisão geral. A vida útil média de motores a gás do ciclo Otto é de 60.000 horas de operação ou aprox. 7,5 anos. Após esse período, é realizada uma revisão geral do motor. Com exceção do bloco do motor e do virabrequim, todas as peças são substituídas. Após a revisão geral, inicia-se um novo





Figura 6.9: Construção de uma usina de cogeração em uma edificação ou em container [Seva Energie AG]

período de mesma duração [6-2]. A vida útil depende, entre outros fatores, da manutenção e conservação dos motores, o que explica a sua grande variação.

Locais de instalação

As usinas de cogeração devem ser instaladas somente em edificações apropriadas para a sua operação. Visando a redução da emissão de ruídos, o edifício deve ser equipado com material isolante e os módulos da usina dotados de uma cobertura de proteção acústica. Além do espaço suficiente para os trabalhos de manutenção, o edifício deve contar com suficiente ventilação para suprir a necessidade de ar dos motores. Conforme o caso, o uso de ventoinhas de exaustão e de ventilação pode ser necessário. A descrição detalhada dos requisitos de locais de instalação de usina de cogeração distribuída pode ser obtida nos Preceitos de Segurança para Usinas de Biogás.

Estão disponíveis unidades de cogeração em containers isolados acusticamente para a instalação em exteriores. Esses containers normalmente satisfazem os requisitos de locais de instalação do fabricante da usina de cogeração. Outra vantagem da arquitetura em container é a montagem completa e teste da usina pelo fabricante. Isso permite reduzir para um a dois dias o tempo entre a instalação e a entrada em operação. Exemplos de instalação de usina de cogeração são mostrados na figura 6.9.

6.2.2 Motores Stirling

O motor Stirling se classifica como motor de ar quente ou expansão. Ao contrário dos motores a combustão, em que o pistão é movimentado pela expansão de gases de combustão interna, no motor Stirling o pistão é movimentado pela expansão de um gás encapsulado,

o qual se dilata pela entrada de calor de uma fonte de energia externa. Como há uma dissociação da fonte de energia/calor e da geração de força do motor Stirling propriamente dita, o calor necessário pode ser fornecido de diferentes fontes energéticas, tais como de um queimador alimentado por biogás.

O princípio de funcionamento do motor Stirling se baseia no efeito de que um gás, quando sujeito a uma alteração de temperatura, ocasiona uma modificação de volume que se converte em trabalho. Movimentado entre um espaço com temperatura constante elevada e um espaço com temperatura constante baixa, o gás de trabalho permite a operação contínua do motor. Isso faz com que o gás de trabalho seja circulado. O princípio de funcionamento é mostrado na figura 6.10.

Em função da combustão contínua, os motores Stirling se caracterizam por baixas emissões de ruídos e poluentes e exigem pouca manutenção. Como os seus componentes sofrem pouco desgaste e o gás circula em uma câmara fechada, seu custo de manutenção esperado é baixo. A eficiência elétrica é inferior à de motores a gás do ciclo Otto convencionais, situando-se entre 24% e 28%. A potência de motores Stirling se situa normalmente abaixo de 100 kW_{el} [6-34]. Uma vez que a combustão se dá externamente, o motor Stirling aceita também biogás de qualidade inferior, podendo ser utilizados gases com baixos teores de metano [6-14]. Possivelmente, a maior vantagem do motor Stirling sobre motores convencionais de combustão de biogás é o fato de dispensar o tratamento preliminar do gás. A desvantagem é a lenta reação a variações de carga, o que tem menor importância em equipamentos estacionários como usinas de cogeração, sendo um fator restritivo, por exemplo, em veículos.

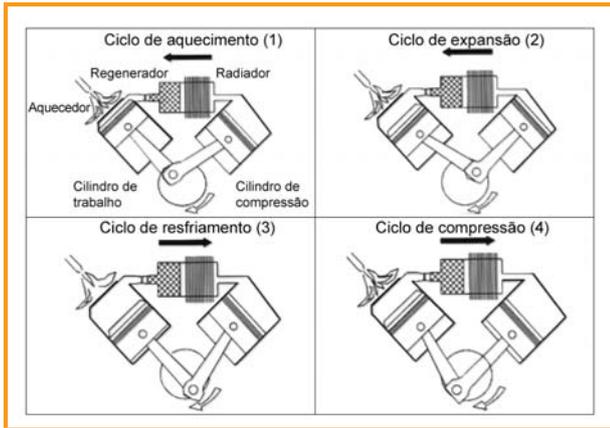


Figura 6.10: Modo de operação de um motor Stirling conforme referências bibliográficas [6-14] e [6-21]

Motores Stirling movidos a gás natural são oferecidos no mercado em classes de potência bastante reduzidas. No entanto, para que possa ser utilizado com mais competitividade em aplicações de biogás, carece de diversos aprimoramentos técnicos. O motor Stirling pode ser usado em usinas de cogeração da mesma forma que motores a gás do ciclo Otto e do ciclo Diesel. Porém, na Alemanha ainda existem poucos projetos-piloto.

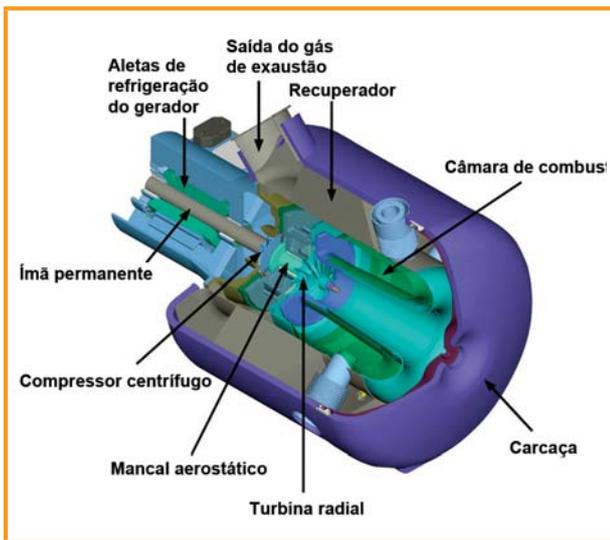


Figura 6.11: Estrutura de uma microturbina a gás [Energietechnologie GmbH]

6.2.3 Microturbinas a gás

Microturbinas a gás ou microturbinas são pequenas turbinas a gás de alta rotação e baixa temperatura e pressão de combustão, com potência elétrica pequena até 200 kW_{el}. Atualmente existem vários fabricantes

de microturbinas a gás nos EUA e na Europa. Diferentemente das turbinas a gás "normais", microturbinas a gás são dotadas de um recuperador que realiza o pré-aquecimento do ar de combustão, o que aumenta a eficiência. A estrutura de uma microturbina a gás é mostrada na figura 6.11.

Em turbinas a gás, o ar é sugado do ambiente e comprimido por um compressor. O ar atinge a câmara de combustão, que recebe o biogás e onde ocorre a queima. A queima provoca o aumento da temperatura e por conseguinte a expansão do volume. Os gases quentes atingem uma turbina, onde então se dilatam. Isso libera consideravelmente mais energia que o necessário para movimentar o compressor. Esse excedente de energia não utilizado pelo compressor é dirigido a um gerador de energia elétrica.

Uma rotação de aprox. 96.000 RPM gera uma corrente elétrica alternada de alta frequência, a qual é processada por um módulo eletrônico de forma ser injetada na rede de energia elétrica. O uso de biogás em microturbinas a gás exige certas adaptações da câmara de combustão e dos bicos de injeção de combustível, em comparação com a operação com gás natural. [6-8]. As emissões de ruídos da microturbina a gás se situam em uma faixa de alta frequência e podem ser facilmente isoladas.

Como o biogás tem de ser inserido na câmara de combustão da microturbina a gás, a qual se encontra a uma sobrepressão de vários bar, é necessário um aumento da pressão do gás. Além da pressão da câmara de combustão, devem ser consideradas perdas de pressão devidas às correntes e fluxos de massa na tubulação de gás, válvulas e queimador, de forma que a sobrepressão deve ser de até 6 bar em relação à pressão atmosférica. Para essa finalidade, a montante da microturbina a gás é instalado um compressor.

Substâncias concomitantes no biogás (principalmente água e siloxanos) podem danificar a microturbina a gás, sendo portanto necessária a secagem e filtração do gás (para teores de siloxano acima de 10 mg/m³ CH₄). No quesito teor de enxofre, as microturbinas a gás têm uma tolerância maior que motores a gás. Microturbinas a gás são capazes de processar biogás com teores de metano de 35% a 100% [6-7], [6-8].

Graças à combustão contínua com excesso de ar a baixa pressão da câmara de combustão, as microturbinas a gás apresentam emissões de gases de escape bem inferiores a de motores. Isso abre novas possibilidades de utilização dos gases de combustão, tais como a secagem direta de ração ou o fornecimento de CO₂ a plantas cultivadas em estufa. O calor residual é

disponibilizado a uma temperatura relativamente alta e transportado unicamente pelos gases de combustão. Isso permite que a utilização do calor produzido seja mais barata e tecnicamente mais simples que no caso dos motores a combustão [6-8], [6-39], [6-37].

Os intervalos de manutenção são sensivelmente mais longos que os de motores, ao menos no caso de microturbinas movidas a gás natural. Conforme dados dos fabricantes, o intervalo de manutenção é de 8.000 horas e a vida útil é de aprox. 80.000 horas. Após cerca de 40.000 horas está prevista uma revisão geral com substituição da seção de ar quente.

As microturbinas têm como desvantagem a eficiência elétrica relativamente baixa, mal atingindo a casa dos 30%. Esse valor, relativamente baixo em relação aos motores convencionais, é compensado pelo bom comportamento a cargas parciais (50% - 100%) e pelo grau de eficiência constante. Os custos de investimento são de 15% a 20% superiores aos de motores de potência equivalente destinados a aplicações de biogás [6-39]. Espera-se que a popularização das microturbinas no mercado torne-as mais baratas no futuro. A EEG de 2009 prevê um bônus de 1 ct €/kWh_{el} para a adoção de microturbinas a gás. Atualmente, experimentos vêm sendo conduzidos com microturbinas movidas a biogás. Sua importância prática, no entanto, ainda não foi comprovada.

6.2.4 Células de combustível

A forma como as células de combustível operam é fundamentalmente distinta daquela que baseia as técnicas convencionais de geração de energia pelo biogás. Nesse caso, a conversão da energia química em eletricidade não é direta. A célula de combustível proporciona uma elevada eficiência elétrica de até 50% a nível de emissões quase nulo. A operação a cargas parciais também se caracteriza por bons graus de eficiência.

O princípio de funcionamento da célula de combustível equivale ao inverso da eletrólise da água. A eletrólise faz uso de cargas elétricas para realizar a quebra de moléculas de água em hidrogênio (H₂) e o oxigênio (O₂). Inversamente, em uma célula de combustível o H₂ e o O₂ são submetidos a cargas elétricas e calor para formar a água (H₂O). Dessa forma, o "combustível" para que a célula realize a reação eletroquímica é constituído pelo hidrogênio e pelo oxigênio [6-17], sendo que a célula essencialmente sempre tem a mesma estrutura. A célula propriamente dita é composta de duas placas que conduzem o gás (ânodo e cátodo), separadas por um eletrólito. Diversos materiais

são utilizados para confeccionar o eletrólito, conforme o tipo de célula de combustível. O princípio de funcionamento é exemplificado na figura 6.12.

Geralmente, exige-se que o biogás seja tratado antes de ser utilizado em células de combustível. Em especial, deve-se remover o enxofre com as técnicas expostas no capítulo 6.1.1. Com o auxílio do processo de reforma do biogás, o metano é convertido em hidrogênio. Conforme o tipo de célula de combustível, diferentes estágios do processo têm de ser realizados – maiores informações se encontram em [6-31]. As células de combustível são designadas de acordo com o eletrólito que utilizam, dividindo-se em células de baixa temperatura (AFC, PEMFC, PAFC, DMFC) e de alta temperatura (MCFC, SOFC). O tipo de célula que melhor atende à aplicação na usina depende do tipo de processamento do calor e das classes de potência disponíveis.

A célula de combustível de membrana eletrolítica polimérica (PEM) é uma opção promissora para aplicações em pequenas usinas de biogás. A temperatura de operação (80 °C) permite injetar o calor diretamente em uma rede de água quente existente. O tipo de eletrólito utilizado proporciona à PEM uma vida útil nominal muito longa, embora seja muito sensível a impurezas no gás combustível. Principalmente a remoção do monóxido de carbono originado no processo de reforma ainda é vista como um obstáculo crítico.

A PAFC (phosphoric acid fuel cell/célula de combustível de ácido fosfórico) é o tipo de célula de combustível mais evoluído atualmente. Sendo a líder no mercado mundial de aplicações com gás natural, ela é a única célula de combustível disponível no mercado que superou o limite de 80.000 horas de operação em testes na prática [6-31]. Hoje existem células PAFC com potência na faixa de 100 - 200 kW_{el} e eficiências elétricas de até 40%. A PAFC é menos suscetível ao dióxido e monóxido de carbono.

A MCFC (molten carbonate fuel cell/célula de combustível de carbonato fundido) utiliza como eletrólito o carbonato na forma fundida. Esse tipo de célula não é sensível à ação do monóxido de carbono e tolera concentrações de até 40% em volume de dióxido de carbono. Como operam em uma faixa de temperatura entre 600 e 700 °C, a reforma pode ser realizada no interior da célula. Seu calor residual pode ser utilizado, por exemplo, em turbinas instaladas a jusante. Os sistemas baseados em MCFC atingem eficiências elétricas de até 50% a uma potência de 40 - 300 kW_{el} e estão sendo lançados no mercado [6-31].

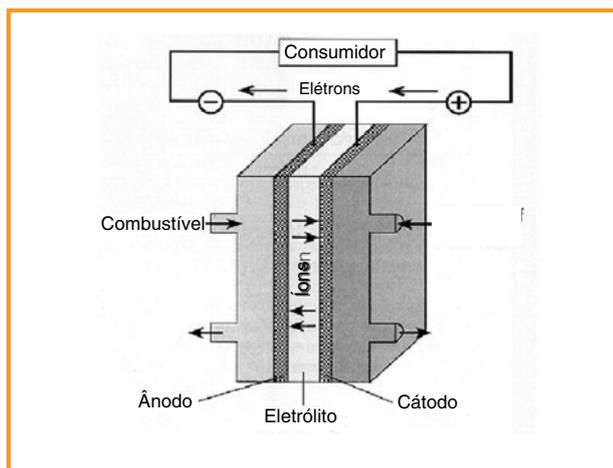


Figura 6.12: Princípio de funcionamento de uma célula de combustível [vTI]

Outra célula de combustível de alta temperatura é a de óxido sólido ou SOFC (solid oxide fuel cell). Ela opera em temperaturas entre 600 e 1.000 °C. Esse tipo de célula se caracteriza por elevadas eficiências elétricas (até 50%) e também permite que a reforma do metano para hidrogênio se realize no interior da célula. Apresenta baixa sensibilidade ao enxofre, uma vantagem no processamento do biogás. Aplicações em biogás, no entanto, ainda se encontram na fase de pesquisa e em projetos-piloto. Essa tecnologia é muito indicada para aplicações em pequena escala destinadas a microrredes de biogás.

Atualmente, os fabricantes vêm favorecendo o uso de PEMFC, concorrente da SOFC em faixas reduzidas de potência (embora ofereça maior eficiência, seu custo também é maior que o da SOFC) [6-31]. Até hoje, contudo, a líder do mercado é a PAFC.

Qualquer que seja o tipo de célula de combustível, seu custo de investimento ainda é bem superior ao de usinas de cogeração baseadas em motores. Conforme [6-31], a PEMFC custa entre 4.000 e 6.000 €/kW. A meta é que o custo seja reduzido para 1.000 a 1.500 €/kW. Vários projetos-piloto vêm avaliando o potencial de redução dos custos de investimento e até que ponto será viável superar os atuais desafios técnicos, principalmente os associados a aplicações com biogás.

6.2.5 Uso do calor residual em sistemas de cogeração prioritária de eletricidade

Na maior parte dos casos, as usinas de cogeração alimentadas com gás natural/biogás adotam como parâmetro de controle a demanda de calor. Isso significa que a eletricidade é gerada sem limitações e a unidade

cogeneradora é operada quando há demanda de calor. Geralmente, as usinas de cogeração com produção prioritária de calor cobrem a demanda básica de um cliente abastecido com calor (70% - 80% da demanda anual), sendo que o pico de demanda é atendido por caldeiras adicionais. Pelo contrário, fala-se em geração combinada com vistas a produzir prioritariamente eletricidade quando as curvas de carga da usina se definem pela demanda de eletricidade. Esse é o caso quando não ocorre injeção de eletricidade ou existe uma demanda de energia elétrica relativamente constante. Grandes usinas ou instalações industriais com suficiente consumo de energia térmica são a forte vocação desse tipo de usina de cogeração. Para que se atinjam grandes tempos de operação, deve haver acumuladores de calor e ser coberta somente a carga básica. É frequente que as usinas sejam dotadas de um gerenciador de carga. Isso significa que a usina é capaz de comutar entre as duas opções de funcionamento conforme a demanda, o que pode ser uma vantagem, por exemplo, em áreas residenciais ou hospitalares.

Na prática, a maioria das usinas de biogás que realiza a conversão descentralizada de biogás em eletricidade opera com prioridade para produzir energia elétrica, na qual a quantidade da energia produzida depende da quantidade máxima que pode ser injetada na rede. Isso é limitado apenas pela quantidade de gás disponível e pelo porte da usina de cogeração. O capítulo 8.4 mostra uma síntese da lucratividade de conceitos possíveis de aproveitamento de calor.

O terceiro modo de operação, com potencial futuro e mencionado aqui sem pormenores, é a utilização orientada à rede. Nesse modelo, a potência de várias usinas é controlada à distância por uma central (usina de energia virtual). A escolha entre os dois modos de operação depende principalmente dos aspectos econômicos.

6.2.5.1 Fornecimento de calor/distribuição de calor (redes locais de calor)

Um fator decisivo para a lucratividade de uma usina de biogás com conversão local de gás em energia elétrica é a venda do calor gerado nessa conversão. Principalmente em áreas rurais, a venda do calor aos habitantes é uma boa oportunidade. Nesse caso, a instalação de redes locais de distribuição de calor permite que a venda tenha ampla cobertura. Uma rede desse tipo possui uma linha dupla de tubos isolados de aço ou PEAD, que transportam a água a 90 °C (influxo) e 70 °C (efluxo). A transferência do calor da usina de biogás para a rede se dá por trocadores de ca-

lor. Cada edifício é equipado com estações de transferência e medidores de calor. A tubulação de calor local deve ser dotada de um sistema de detecção de vazamentos e estar assentada em profundidade suficiente (1m) a fim de suportar cargas de veículos e baixas temperaturas. Também devem ser observados os seguintes pontos:

- planejamento preliminar e projeto em tempo hábil
- elevado grau de consumo mínimo de calor
- quantidade suficiente de residências conectadas (no mín. 40)
- residências conectadas o mais próximo possível umas das outras.

Os clientes que adquirem a energia térmica têm a vantagem de desfrutar da independência dos grandes fornecedores de energia, o que assegura o abastecimento e diminui os custos. Essa forma de comercialização de calor foi implementada em várias das chamadas Vilas Bioenergéticas (p. ex. Jühnde, Freiamt e Wolpertshausen, Alemanha). O comprimento da canalização varia entre 4 e 8 km. E eficiência econômica das redes locais de calor é abordada detalhadamente no capítulo 8.4.3.

6.2.5.2 Geração de frio

A conversão de calor em frio significa outra oportunidade de aproveitamento do calor residual originado no processo de combustão do biogás. Isso se dá pelo chamado processo de sorção, que se distingue em processo de resfriamento por adsorção e processo de resfriamento por absorção. Em virtude da sua maior importância, será descrito o processo de absorção e um refrigerador de absorção, que funciona sob o mesmo princípio que as antigas geladeiras. O princípio do processo é apresentado na figura 6.13.

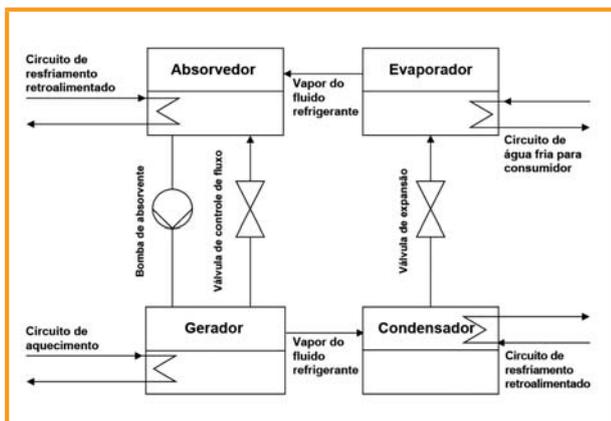


Figura 6.13: Esquema de funcionamento de um refrigerador de absorção



Figura 6.14: Exemplo de refrigerador de absorção em uma usina de biogás [DBFZ]

Um exemplo de aplicação prática em uma usina de biogás se encontra na figura 6.14.

A geração de frio utiliza uma mistura binária de fluidos de trabalho composta de fluido refrigerante e absorvente (solução). A solução absorve o fluido refrigerante, que em seguida é novamente separado. Podem-se utilizar como fluidos de trabalho a água (fluido refrigerante) e o brometo de lítio (agente absorvente) para a faixa de temperatura 6/12 °C ou amoníaco (refrigerante) e água (absorvente) para a faixa de temperatura até -60 °C.

O fluido refrigerante e o absorvente são separados no gerador. Para tal, é necessário aquecer a solução, o que é realizado com o calor disponibilizado pela usina de cogeração. Primeiro o fluido refrigerante se vaporiza em virtude do seu baixo ponto de ebulição e atinge o condensador. A mistura, agora diluída, atinge o absorvedor. No condensador, o fluido refrigerante é resfriado e passa para o estado líquido. Na fase seguinte, uma válvula de expansão alivia a pressão até a pressão de vaporização correspondente à temperatura desejada. A seguir, no evaporador o fluido refrigerante é vaporizado pela absorção de calor. É aqui que ocorre o resfriamento do circuito de refrigeração propriamente dito, ao qual o consumidor se encontra conectado. O vapor do fluido refrigerante originado flui para o absorvedor. No absorvedor, o fluido refrigerante é absorvido pelo absorvente e o ciclo se conclui [6-13], [6-38].

Esse equipamento tem como única peça mecânica móvel a bomba do absorvente e, portanto, exige muito pouca manutenção. Os refrigeradores de absorção também têm a vantagem de consumir pouca energia elétrica em comparação com refrigeradores de com-

pressão, embora estes consigam produzir temperaturas mais baixas. No meio agrícola, o processo é utilizado com diversas finalidades tais como o resfriamento de leite e a climatização de estábulos.

6.2.5.3 Conceitos de conversão posterior de energia

O ORC (organic rankine cycle/ciclo orgânico de Rankine) é uma tecnologia que permite converter em eletricidade frações do calor excedente da usina de cogeração mesmo a baixas temperaturas. Essa tecnologia funciona sob um princípio análogo ao da máquina a vapor (cf. [6-14]), com a diferença de que em vez de utilizar a água como fluido de trabalho, faz uso de substâncias com baixos pontos de condensação e ebulição. O processo teve origem na tecnologia de geração de eletricidade a partir de energia geotérmica, que há anos já vem sendo utilizada com êxito. Atualmente, vêm sendo testados fluidos de trabalho com menor impacto ambiental tais como o óleo de silicone. Essas substâncias deverão substituir as substâncias levemente inflamáveis (tolueno, pentano, propano, etc.) e as prejudiciais ao ambiente (CFC), eliminando-as do mercado [6-14]. Embora o processo OCR muitas vezes já tenha sido realizado em combinação com usinas de geração de energia a partir da madeira, o uso dessa tecnologia associada à combustão de biogás com motores ainda se encontra em fase de desenvolvimento.

Segundo estimativas, a partir de uma usina de cogeração com 1 MW_{el} , é possível gerar eletricidade adicional na ordem de 70 - 100 kW_{el} (7% - 10%) por meio do processo ORC [6-28].

De acordo com [6-19], foi possível desenvolver um protótipo de ORC com potência nominal de aprox. 100 kW_{el} e eficiência de 18,3%. Algumas usinas de biogás já estão operando com a tecnologia ORC instalada a jusante.

Uma alternativa ao ORC são as tecnologias que conectam um gerador adicional à turbina de gases de combustão e geram potencial elétrico adicional, aumentando o grau de eficiência do motor.

6.3 Injeção de biogás

6.3.1 Injeção na rede de gás natural

Na Alemanha, a injeção do biometano se dá em uma rede de gás natural bem desenvolvida. Tanto no Oeste como no Leste da Alemanha existem grandes sistemas de gás natural, que permitem o amplo abastecimento da população e a recepção do biogás. O comprimento

total da rede é de cerca de 375.000 km [6-5]. Uma grande parte do gás natural é obtida pela importação de outros países europeus (85%). Os principais exportadores são a Rússia (35%), Noruega (27%) e Dinamarca (19%) [6-10]. Devido à existência de diversos fornecedores, na Alemanha formaram-se cinco redes de gás natural, que se distinguem quanto à qualidade do gás transportado (redes de gás H e L).

A injeção do biogás tratado pode se dar em diferentes tipos de redes e com diferentes níveis de pressão. Elas se classificam em redes de baixa (até 100 mbar), média (100 mbar a 1 bar) e alta pressão (1 a 120 bar). Também é comum a diferenciação em quatro níveis de abastecimento: rede internacional de longa distância, rede suprarregional, rede regional e rede regional de distribuição [6-5]. No processo de tratamento do biogás, a sua pressão de saída deve ser ajustada à pressão da rede a fim de diminuir os custos de compressão posterior e otimizar os custos de disponibilização. Antes da entrada do biogás tratado na rede, é necessário aumentar a sua pressão acima da pressão existente no ponto de injeção da linha de transporte. Cada ponto de injeção, portanto, tem de ser monitorado por uma estação de medição e controle de pressão.

No ano passado, a legislação criou diversos mecanismos para facilitar a injeção de biogás. Além da alteração da Lei Alemã de Energias Renováveis em 01.01.2009, com o auxílio do GasNZV (Regulamento de Acesso à Rede de Gás) e do GasNEV (Regulamento da Remuneração da Rede de Gás), atualizados em 2008 e 2010, foi possível resolver questões técnicas e econômicas controversas em favor da injeção de biogás. Entre as alterações, foi estipulado que os custos de investimento da conexão à rede de gás, em especial dos equipamentos de medição e regulação da pressão do gás, dos compressores e da tubulação de conexão à rede pública de gás natural devem ser divididos em 25% para o fornecedor do gás e 75% para a distribuidora, nos casos em que a usina de biogás se situa a até 10 quilômetros da rede. Além disso, a participação do fornecedor nos custos da ligação à rede foi reduzida a 250.000 € em distâncias de até um quilômetro. Os custos operacionais fixos continuam sendo de responsabilidade da distribuidora. Conforme a alteração mais importante em 2008, os produtores do biometano passam a ter prioridade na conexão à rede de gás [6-11]. Assim, em determinadas regiões da rede (de distribuição) ou épocas ("noites mornas de verão") com fluxo baixo, a quantidade injetada pode ser maior que a capacidade de recepção, sendo a distribuidora obrigado a comprimir o exce-



dente de gás e transferi-lo para a rede de nível superior. A injeção em redes de alta pressão ainda não atingiu o estado da técnica. O mercado, no entanto, disponibiliza compressores em diferentes dimensões para diversos fluxos volumétricos. Maiores informações sobre as condições básicas da legislação se encontram no capítulo 7.

As exigências de qualidade do biogás injetado também são regulamentadas e documentadas pelas normas e recomendações técnicas da DVGW. A folha de processo G262 fornece instruções sobre a constituição de gases de fontes renováveis, a G260 regula a qualidade do gás e a G685 a contabilização do biogás injetado. O preparo do biometano para que atenda aos requisitos de qualidade previstos nessas normas e recomendações técnicas é de responsabilidade do fornecedor, o ajuste fino (poder calorífico superior, odor, pressão) é de responsabilidade da distribuidora. Isso deve ser realizado com o máximo de exatidão possível a fim de evitar zonas mistas e de oscilação.

A única diferença essencial na configuração de uma usina de biogás destinada à injeção na rede de distribuição é que ela dispensa a unidade de cogeração. Por isso, considerar haver alternativas para a disponibilização de eletricidade e calor do processo. A processo pode ser alimentado com energia elétrica da rede, o biodigestor e os equipamentos de tratamento (p. ex. para o tratamento do biogás com aminas) podem ser aquecidos por meio de uma caldeira. Outra possibilidade é a operação em paralelo de uma usina de cogeração dimensionada com capacidade para fornecer a energia necessária aos processos. O biogás restante seria injetado na rede de distribuição.

6.3.2 Injeção em microrredes de gás

Uma microrrede de gás consiste na conexão de uma usina de biogás com um ou mais equipamentos de processamento de gás (usina satélite de cogeração) por meio de tubos. O seu uso é recomendável quando não é possível utilizar completamente o biogás no próprio local e os usuários do calor se localizam a uma distância aceitável. Seu princípio é análogo ao da injeção do biometano na rede de gás natural, embora exija um grau inferior de purificação do gás. Como não é necessário alterar o conteúdo energético do gás, é necessário realizar apenas a sua secagem e dessulfurização com os processos descritos em 6.1.1 e 6.1.2. Outra vantagem é o melhor aproveitamento do calor e o aumento da eficiência total associado.

São utilizados principalmente dois processos: operação exclusiva com biogás; ou a mistura contínua (ajuste da qualidade do gás exigida) ou temporária (picos de demanda) com gás natural. As aplicações mais comuns são em unidades autônomas de contabilização, instalações municipais, processos industriais e grandes empresas agrícolas.

Até o presente a EEG não prevê o subsídio de microrredes de biogás, uma vez que a maior parte do ônus financeiro resulta dos custos de investimento. Por outro lado, os custos operacionais são bastante reduzidos. O Programa de Incentivo ao Mercado, porém, é uma forma de fomento de investimento que concede um subsídio de 30% sobre tubulações de biogás bruto de 300 m ou mais de comprimento [6-6].

A Alemanha já conta com diversas microrredes de gás, com destaque para as redes na cidade de Braunschweig e no Centro Agrícola Eichhof. A microrrede tem direito a todos os bônus previstos na EEG 2009, o que faz dela uma opção eficiente para a injeção de biogás.

6.4 Combustível para veículos

Há anos a Suécia e a Suíça vêm utilizando o biogás como combustível para ônibus, caminhões e também em veículos de passeio. Os diversos projetos realizados na Alemanha não tiveram grande popularidade. Além do posto de abastecimento de biometano na cidade alemã de Jameln, desde 2009 mais de 70 postos têm comercializado uma mistura de biogás e gás natural [6-3]. Até o momento, o caráter dessas iniciativas tem sido mais político (publicidade) que econômico.

O uso do biogás como combustível para veículos exige o seu tratamento para satisfazer os atuais requisitos de qualidade dos motores convencionais. Isso envolve a remoção das substâncias corrosivas aos motores, tais como o sulfeto de hidrogênio, e a eliminação do dióxido de carbono (CO₂) e do vapor d'água do biogás. Uma vez que os veículos disponíveis no mercado são preparados para operar com gás natural, recomenda-se que o biogás seja tratado até a qualidade equivalente (cf. capítulo 6.3.1).

Os veículos a gás são fabricados por todas as montadoras de peso e comercializados mundialmente, embora a oferta na Alemanha ainda seja restrita. Os modelos oferecidos podem ser equipados com motores dedicados ou bi-fuel. Os motores dedicados operam exclusivamente com gás e possuem um pequeno tanque de gasolina de emergência. Os motores bi-fuel funcionam tanto a gás como a gasolina. Em função do

elevado volume ocupado pelo biogás não comprimido, o seu uso não permite autonomias significativas. Por isso, o biogás é armazenado em cilindros de gás comprimido a cerca de 200 bar na traseira ou no piso do veículo.

Desde 2002, os biocombustíveis são isentos de impostos, o que viabiliza a construção de postos de abastecimento de biogás. O custo do tratamento do biogás é comparável àquele envolvido na injeção do biogás em redes de distribuição. Além dele, incidem custos adicionais devidos à compressão do biometano para que atinja a pressão exigida.

6.5 Biogás como fonte de energia térmica

A combustão do biogás tratado para a disponibilização de calor pode ser facilmente realizada. Os queimadores utilizados para tal são normalmente equipamentos universais que podem ser ajustados a qualquer tipo de gás. No caso do biogás não refinado em qualidade de gás natural, os equipamentos devem ser ajustados correspondentemente. Equipamentos com peças de metal colorido e aços de baixa liga são suscetíveis à corrosão pelo sulfeto de hidrogênio, o que exige que tais peças sejam substituídas ou o gás seja tratado.

Os queimadores se dividem em atmosféricos e a ar forçado. Os atmosféricos obtêm o ar de combustão do ambiente por auto-sucção. A pressão necessária do gás, de aproximadamente 8 mbar, normalmente é proporcionada pela própria usina de biogás. Nos queimadores de ar forçado, o ar de combustão é fornecido por um soprador e a pressão mínima exigida é de 15 mbar. Conforme o caso, para que a pressão do gás inicial exigida seja atingida é necessário o uso de compressores de gás [6-13].



Fonte: Paterson (FNR)

Com a alteração da Lei Alemã de Energias e Calor Renováveis (EEWärmeG), as aplicações de biogás para a geração de calor ganharam em importância. Essa lei determina que a geração de calor em imóveis construídos após 01.01.2009 seja realizada por meio de energias renováveis. No entanto, além de se restringir a novos edifícios (com exceção do Estado de Baden-Württemberg), a lei se limita ao calor oriundo de usinas de cogeração com biogás.

6.6 Fontes bibliográficas

- [6-1] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (ASUE), Energie-referat der Stadt Frankfurt Referat 79A.2, BHKW-Kenn-daten 2001
- [6-2] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (ASUE), Energie-referat der Stadt Frankfurt Referat 79A.2, BHKW-Kenn-daten 2005
- [6-3] Bio-Erdgas an Karlsruher Erdgas-Tankstellen, [http://www.stadtwerke-karlsruhe.de/swka/aktuel-les/2009/07/20090711.php](http://www.stadtwerke-karlsruhe.de/swka/aktuelles/2009/07/20090711.php), última visita: 06.08.2009
- [6-4] Brauckmann, J.: Planung der Gasaufbereitung eines mobilen Brennstoffzellenstandes. TCC, Fraunhofer UMSICHT e FH Münster, 2002
- [6-5] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz, Leipzig, 2006
- [6-6] Daniel, J.; Scholwin, F., Vogt, R.: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland, Materialband:D - Biogasnut-zung, 2008
- [6-7] Dielmann, K. P.; Krautkremer, B.: Biogasnutzung mit Mikrogasturbinen in Laboruntersuchungen und Feld-tests, Stand der Technik und Entwicklungschancen, Elf-tes Symposium Energie aus Biomasse Biogas, Pflanzenöl, Festbrennstoffe, Ostbayrisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) Regensburg, Atas do Sim-pósio, 11/2002
- [6-8] Dielmann K. P.: Mikrogasturbinen Technik und Anwendung, BWK Das Energie- Fachmagazin, 06/2001, Springer VDI Verlag, 2001
- [6-9] Einspeiseatlas, <http://www.biogaspartner.de/index.php?id=10104> última visita: 07/2010
- [6-10] FORUM ERDGAS: Sichere Erdgasversorgung in Deutschland. http://www.forum-erd-gas.de/Forum_Erdgas/Erdgas/Versorgungssicherheit/Sichere_Erdgasversorgung/index.html, (último acesso: 06.08.2009)
- [6-11] Regulamento de Acesso à Rede de Gás (GasNZV) de 25 de julho de 2005 (BGBl. I p. 2210), última alteração pelo artigo 2 § (3) do Regulamento de 17 de outubro de 2008 (BGBl. I p. 2006
- [6-12] Heinze, U.; Rockmann, G.; Sichtung, J.: Energetische Verwertung von Biogasen, Bauen für die Landwirt-schaft, fascículo 3, 2000
- [6-13] Jäkel, K.: Managementunterlage "Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und -verwertung", Sächsische Lan-desanstalt für Landwirtschaft, 1998/2002
- [6-14] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: Energie aus Biomasse Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer-Ver-lag, 2009
- [6-15] Neumann, T.; Hofmann, U.: Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW; publicado na Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geolo-gie, fascículo 8/2009, Dresden
- [6-16] Alteração da TA Luft, Biogas Journal nº 1/2002, Fach-verband Biogas e.V., 2002
- [6-17] Mikro-KWK Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und um-weltfreundlichen Energieverbrauch e. V., Verlag Ratio-neller Erdgaseinsatz
- [6-18] Mitterleitner, Hans: depoimento pessoal de 2004
- [6-19] ORC-Anlage nutzt Abwärme aus Biogasanlagen, <http://www.energynet.de/2008/04/23/orc-anlage-nutzt-abwarme-aus-biogasanlagen/> última visita: 05.08.2009
- [6-20] Polster, A.; Brummack, J.; Mollekopf, N.: Abschlussbe-richt 2006 – Verbesserung von Entschwefelungsverfah-ren in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, TU Dresden
- [6-21] Raggam, A.: Ökologie-Energie; Skriptum zur Vorle-sung; Institut für Wärmetechnik; Technische Universi-tät Graz, 1997
- [6-22] Ramesohl, S.; Hofmann, F.; Urban, W.; Burmeister, F.: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Estudo financiado pela BGW e DVGW. 2006.
- [6-23] Rank, P.: Wartung und Service an biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken, Biogas Journal Nº 2/2002, Fach-verband Biogas e. V., 2002
- [6-24] Richter, G., Grabbert, G., Shurrab, M.: Biogaserzeugung im Kleinen. Gwf-Gas Erdgas (1999), Nº 8, pp. 528 - 535
- [6-25] Swedish Gas Center: Report SGC 118 – Adding gas from biomass to the gas grid. Malmö, 2001, disponível em: <http://www.sgc.se/dokument/sgc118.pdf>
- [6-26] Schlattmann, M.; Effenberger, M.; Gronauer, A.: Abgas-emissionen biogasbetriebener Blockheizkraftwerke, Landtechnik, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 06/2002
- [6-27] schmittenertec GmbH, http://www.schmitt-enertec.de/deutsch/bhkw/bhkw_technik.htm Acesso em 31.07.09
- [6-28] Schneider, M.: Abwärmenutzung bei KWK – innova-tive Konzepte in der Verbindung mit Gasmotoren, Ko-operationsforum Kraft-Wärme-Kopplung – Innovative Konzepte für neue Anwendungen, Nürnberg, 28 de se-tembro de 2006
- [6-29] Schnell, H-J.: Schulungen für Planer- und Serviceperso-nal, Biogas Journal Nº 2/2002, Fachverband Biogas e. V.,
- [6-30] Schönbucher, A.: Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüs-tungen und Prozesse. Springer-Verlag, Heidelberg, 2002

- [6-31] Scholz, V; Schmersahl, R.; Ellner J.: Effiziente Aufbereitung von Biogas zur Verstromung in PEM-Brennstoffzellen, 2008
- [6-32] Solarenergieförderverein Bayern e. V.: Biogasaufbereitungssysteme zur Einspeisung in das Erdgasnetz – Ein Praxisvergleich, Munique, 2008
- [6-33] Termath, S.: Zündstrahlmotoren zur Energieerzeugung Emissionen beim Betrieb mit Biogas, Elftes Symposium Energie aus Biomasse Biogas, Pflanzeöl, Festbrennstoffe, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) Regensburg, Atas do Simpósio, 11/2002
- [6-34] Thomas, B.: Stirlingmotoren zur direkten Verwertung von Biobrennstoffen in dezentralen KWK-Anlagen, palestra na conferência BWPLUS, Forschungszentrum Karlsruhe, 7 de março de 2007
- [6-35] Urban, W., Girod, K., Lohmann, H.: Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Resultados do estudo de mercado 2007 – 2008
- [6-36] Weiland, P.: Neue Trends machen Biogas noch interessanter, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar Fachbuch, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 2002
- [6-37] Weiland, P.: Notwendigkeit der Biogasaufbereitung, Ansprüche einzelner Nutzungsrouten und Stand der Technik. Palestra no workshop "Aufbereitung von Biogas" da FNR em 17/18.06.2003 em Braunschweig.
- [6-38] Wie funktioniert eine Absorptionskältemaschine, <http://www.bhkw-info.de/kwkk/funktion.html> Acesso em 05.08.2009
- [6-39] Willenbrink, B.: Einsatz von Micro-Gasturbinen zur Biogasnutzung, Erneuerbare Energien in der Land(wirt)schaft 2002/2003 – volume 5, 1ª edição de dezembro de 2002, Verlag für land(wirt)schaftliche Publikationen, Zeven
- [6-40] Willenbrink, B.: Einsatz von Micro-Gasturbinen zur Biogasnutzung, Firmenschrift PRO2
- [6-41] ASUE (2005): BHKW Kenndaten
- [6-42] Aschmann V., Kissel R., Gronauer, A.: Umweltverträglichkeit biogasbetriebener BHKW in der Praxis, Landtechnik 2/2008, pp. 77 - 79



Fonte: Paterson (esquerda), Schüsseler (FNR)





7 Condições Legais e Administrativas

Durante o planejamento e operação de usinas de biogás, um grande número de questões legais se coloca ao operador da usina. Antes de a usina ser erguida, o operador deve considerar cuidadosamente a questão da conexão à rede de distribuição, a elaboração dos contratos e os requisitos legais para se obter uma licença. A Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG) e as taxas de remuneração e bônus nela previstas permitem diferentes possibilidades de design da usina, escolha dos materiais utilizados, tecnologia implementada e aproveitamento de calor, fatores esses a serem pesados durante o projeto da usina. Por fim, quando a usina já estiver em funcionamento, seu operador deverá cumprir todas as exigências do direito público, operar a usina em consonância com as estipulações da EEG e apresentar todos os comprovantes exigidos.

7.1 Subsídio de energia elétrica de biomassa

Tendo como instrumento a Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG), a Alemanha oferece subsídios para usinas de biogás.

Visando a proteção do clima e do meio ambiente, a alteração da EEG de 1º de janeiro de 2009 tem como meta aumentar em no mínimo 30% a participação das energias renováveis no abastecimento de energia elétrica até 2020. Especialmente a geração descentralizada de eletricidade a partir da biomassa pode contribuir significativamente para atingir essa meta. Isso inclui o biogás gerado a partir de biomassa, conforme o Regulamento Alemão de Biomassa (BiomasseV).

A EEG dá ao operador de uma usina de biogás o direito de conectá-la à rede pública de energia elétrica e injetar a eletricidade gerada. Mas esse não é o seu

único privilégio em relação aos produtores convencionais de energia: pela eletricidade injetada o operador da usina recebe também um pagamento ao longo de 20 anos, regulamentado por lei. O valor do pagamento é definido por vários critérios, tais como o tamanho da usina, a data do início de operações e os materiais utilizados. Os diferentes tipos de bônus estabelecidos pela EEG 2009 têm especial importância na determinação da remuneração pela injeção de energia.

7.1.1 O sistema de bônus na EEG

Os bônus previstos na EEG constituem um sofisticado sistema de incentivos que visam proporcionar a geração de eletricidade a partir da biomassa de forma eficiente e promovendo a proteção climática e ambiental. A geração de energia elétrica a partir de biomassas dedicadas, por exemplo, é especialmente incentivada. O bônus NawaRo, como é referido na Alemanha (NawaRo = nachwachsende Rohstoffe/matérias-primas renováveis), foi introduzido em 2004 a fim de fomentar as culturas energéticas e o aproveitamento de dejetos animais visando a proteção climática. Várias outras disposições da EEG contribuem para a proteção do clima, tais como o bônus KWK (Kraft-Wärme-Kopplung = cogeração de calor e eletricidade) para a operação de usinas de cogeração. Esse bônus concede uma remuneração superior àqueles operadores de usinas que fazem uso racional do calor residual produzido na geração de eletricidade, o qual contribui para reduzir as emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis. O bônus de tecnologia apoia especificamente aquelas tecnologias de ponta para a produção eficiente de eletricidade que têm grande potencial no médio e longo prazo mas que atualmente não são competitivas.

7.2 Conexão à rede e injeção de energia elétrica

Os incentivos oferecidos pela EEG exigem que o operador da usina disponibilize a eletricidade produzida para a rede pública de distribuição de energia elétrica. Para isso, é necessário que a usina seja fisicamente ligada à rede de distribuição de energia.

7.2.1 Conexão à rede elétrica

Ao planejar e construir a usina de biogás, é muito importante que, ainda na fase inicial, o operador entre em contato com a distribuidora de energia para discutir todas as modalidades de conexão da usina à rede. O primeiro passo é informar à distribuidora o propósito de construir uma usina de biogás e cogeração em um determinado local. Deve também ser informada a potência elétrica prevista na instalação.

Antes que os trabalhos de conexão à rede sejam iniciados, geralmente deve ser feita a chamada avaliação de compatibilidade com a rede. Essa avaliação tem como objetivo determinar se, onde e sob que circunstâncias a injeção da potência elétrica pretendida pelo operador da usina é viável do ponto de vista físico e técnico. Na prática, a avaliação de compatibilidade com a rede é geralmente realizada pela distribuidora de energia elétrica. A avaliação, contudo, também pode ser realizada por terceiros. Nesse caso, a distribuidora se obriga a fornecer ao operador da usina todas as informações necessárias para a condução da avaliação.

O operador da usina se compromete a manter os custos de conexão à rede o mais baixo possível e definir um ponto de injeção na rede que esteja o mais próximo possível da usina. Isso corresponde também ao caso padrão previsto na lei. O ponto em que a energia é injetada na rede, chamado de ponto de entrega ou conexão, pode no entanto estar situado a uma distância maior. A determinação do ponto de entrega conforme a legislação é decisiva para a divisão dos custos envolvidos entre o operador da usina e a empresa distribuidora e não raro leva ao litígio entre as partes (cf. Determinação do ponto de entrega 7.2.1.1).

Conforme o caso, é necessário otimizar ou ampliar a rede, ou torná-la mais robusta, a fim de permitir que a eletricidade injetada no ponto de entrega possa ser recebida e transportada sem dificuldades. Isso é referido pela legislação como a ampliação da capacidade. Desde que economicamente justificável, o operador da usina tem o direito de exigir que a distribuidora

amplie imediatamente a capacidade da rede, se isso for necessário para que a energia gerada pela usina de cogeração a biogás possa ser absorvida. Se a distribuidora não atender à exigência do operador da usina, este tem o direito de exigir indenização. Para maiores detalhes, consulte Ampliação da capacidade 7.2.1.2.

Após a distribuidora e o operador da usina chegarem a um acordo sobre o ponto de entrada, o operador deve solicitar formalmente a reserva da capacidade do ponto de entrega. A seguir, antes mesmo da construção da usina, pode-se iniciar a **conexão com a rede**. Geralmente, o operador da usina encarrega a distribuidora de estabelecer a conexão, embora ela também possa ser terceirizada por firmas especializadas. O mesmo vale para a medição da eletricidade injetada. Via de regra é o operador da usina quem arca com os custos envolvidos na conexão à rede elétrica (consultar também o capítulo sobre custos 7.2.1.3).

O direito do operador da usina de se conectar à rede de distribuição é diretamente derivado da EEG. Por essa razão, um contrato de conexão à rede não é estritamente necessário, embora possa ser oportuno principalmente para esclarecer questões técnicas entre o operador e a distribuidora. Antes de firmar o contrato, o operador da usina deve submetê-lo à avaliação jurídica.

7.2.1.1 Determinação do ponto de entrega

A lei denomina de ponto de entrega o local em que se dá a conexão da usina à rede de distribuição. Segundo a EEG, de modo geral a conexão deve ser feita no ponto em que o nível de voltagem da rede seja adequado para receber a energia e situado à menor distância em linha reta até a usina. Se, no entanto, for constatado que a conexão a um ponto mais distante de outra rede custar menos, a ligação tem de ser feita a esse ponto. A alteração da EEG de 1º de janeiro de 2009, porém, não deixa claro se isso vale também para um ponto mais distante da mesma rede que envolva custos inferiores.

A comparação dos valores deve levar em conta o panorama geral, sendo que a princípio é irrelevante se os custos das alternativas consideradas são arcados pela distribuidora ou pelo operador da usina. O ponto de entrega estipulado na lei deve ser determinado com base em uma comparação econômica geral. Só numa segunda etapa é que se decide que medidas serão tomadas pelo operador e que medidas serão de responsabilidade da distribuidora.



Esse princípio será ilustrado como a seguir: o operador "A" constrói ao lado de sua fazenda uma usina de biogás com potência elétrica de 300 kW e deseja conectá-la a uma rede elétrica pública. A ligação elétrica mais próxima (15 m) da usina de cogeração é uma instalação de baixa tensão. Do ponto de vista técnico, porém, em virtude de sua baixa tensão, essa linha não é adequada para receber a energia da usina. Por isso, deve-se procurar o ponto de entrega mais próximo que seja de média tensão. Caso a conexão nesse ponto de média tensão exija, p. ex., a ampliação da rede, e portanto implique em maiores custos que a ligação a um ponto mais distante da rede de média tensão, é a este ponto que a usina deverá ser ligada. Nessa fase, a questão da divisão de custos não é considerada (maiores detalhes em 7.2.1.3).

O operador, contudo, tem o direito de escolher um ponto de entrega diferente do ponto definido pelos critérios acima mencionados. Isso é desejável principalmente quando esse ponto alternativo permite ao operador conectar a usina mais rapidamente para que a injeção de energia na rede se inicie mais cedo. Nesse caso, o operador é obrigado a arcar com a diferença dos custos.

Quem tem a última palavra sobre essa decisão, porém, é a distribuidora, que tem o direito a atribuir o ponto de entrega definitivo. Caso faça uso desse direito, a distribuidora é obrigada a arcar com os custos adicionais incorridos pela não conexão com o ponto definido pelos critérios legais, ou seja, o ponto de entrega mais barato e próximo.

7.2.1.2 Ampliação da capacidade

Se não for possível receber a energia elétrica no ponto de entrega previsto na lei em virtude da baixa capacidade da rede, o operador da usina pode exigir que a distribuidora otimize, amplie ou torne a rede mais robusta, conforme o estado da técnica. Esse direito pode ser exercido antes mesmo da obtenção da licença para a construção ou do parecer de emissões, ou de uma decisão oficial preliminar. É necessário, porém, que o planejamento da usina já esteja em estágio avançado. Um exemplo é quando já foram encomendados planejamentos detalhados ou já existem os contratos de construção.

A distribuidora deve iniciar a ampliação somente após a solicitação explícita do operador da usina.

7.2.1.3 Divisão de custos na conexão à rede e ampliação

A legislação distingue entre custos de conexão e custos de ampliação no que se refere aos custos envolvidos na ligação de uma usina de biogás à rede pública de energia elétrica. Conforme essa distinção, o operador da usina arca com os custos da conexão à rede e a distribuidora de energia é responsável pela otimização, ampliação e aumento da robustez da rede. Na prática, nem sempre há consenso sobre se uma determinada medida, por exemplo o assentamento de condutores de energia elétrica ou a construção de uma subestação, deve ser considerada como medida para a conexão à rede ou para a sua ampliação. Como fatores decisivos, deve-se avaliar se a medida é necessária para a operação da rede e quem é ou será proprietário dos condutores e demais componentes do equipamento construído. Em determinados casos, isso pode significar um obstáculo à delimitação das responsabilidades. Em todo caso, recomenda-se ao operador da usina que não adquira condutores, transformadores e demais equipamentos que julgue pertencerem à rede e não ao seu equipamento de conexão.

Como os custos dos trabalhos de construção necessários para a conexão da usina à rede podem ser muito diversos e dependem em grande parte do ponto de entrega, a escolha do ponto é de especial importância para o operador da usina.

Checklist "conexão à rede elétrica"

- Consultar a empresa distribuidora sobre a conexão com antecedência
- Avaliação de compatibilidade com a rede pela distribuidora ou por terceiros
- Importante: Determinação do ponto de entrega correto
- Exigir a ampliação da rede, se necessário
- Se for o caso, estabelecimento de um contrato de conexão à rede
- Trabalhos de conexão e ampliação

7.2.2 Gerenciamento da injeção de energia

Em acordo com a EEG, o operador de uma usina de biogás (e demais tipos de usinas previstos nessa lei) cuja potência elétrica seja superior a 100 kW tem a obrigação de equipar a usina com equipamentos que permitam um gerenciamento eficiente da injeção de energia pela empresa distribuidora. O gerenciamento da injeção de energia tem como objetivo evitar a sobrecarga da rede. Para isso, a distribuidora está autorizada a reduzir a potência de equipamentos de geração de energia com mais de 100 kW ou desligá-los da

rede, nos casos previstos pela legislação. Em tais casos, ela deve sempre levar em conta a prioridade da energia oriunda de fontes renováveis e da cogeração sobre a energia gerada por meios convencionais. Em caso de risco de sobrecarga da rede, a distribuidora tem antes de reduzir a potência das unidades convencionais de geração de energia.

A EEG exige que usinas de biogás com potência superior a 100 kW sejam equipadas com dispositivos de controle remoto que permitam reduzir a potência injetada, medir a energia e transmitir os dados medidos à distribuidora. Usinas de biogás já em operação antes de 1º de janeiro de 2009 tiveram até o fim de 2010 para se atualizar.

Ao restringir a potência de uma usina por um determinado período, a distribuidora tem a obrigação de ressarcir o operador da usina da remuneração prevista na EEG, e das perdas de receita pela venda de calor, caso existam. O operador da usina, por sua vez, deve descontar as despesas economizadas, principalmente referentes ao combustível não gasto.

7.2.3 Injeção de energia elétrica e comercialização direta

A pré-condição para o pagamento da remuneração e bônus da EEG é que a eletricidade seja injetada na rede pública e disponibilizada à empresa distribuidora. Caso a usina seja conectada a uma rede própria (p. ex. a rede de uma fábrica) ou a uma rede de terceiros, a energia injetada na rede pública pode ser registrada em base contábil e comercial.

Embora o operador tenha a opção de utilizar a energia, no todo ou em parte, para suprir a própria demanda ou para abastecer diretamente terceiros, em ambos os casos não terá direito à remuneração da EEG.

O operador também tem a opção de, temporariamente, abrir mão da remuneração da EEG e vender a eletricidade injetada na rede elétrica pública diretamente a terceiros ou no mercado atacadista de energia elétrica (por exemplo na EEX, a bolsa de energia elétrica de Leipzig). Casos e opte pela venda em uma bolsa de energia elétrica, a energia é comercializada como genérica, independentemente da sua origem. Além disso, o valor ecológico agregado da geração de eletricidade de fontes renováveis pode ser comercializado pelo operador sob a forma de certificados de energia verde (p. ex. do sistema RECS). Em contratos de fornecimento bilaterais, também é possível a venda direta como "energia elétrica verde". A comercialização direta,

contudo, só é economicamente viável se as receitas da venda própria de energia forem superiores às receitas que o operador poderia obter pela remuneração conforme a EEG.

A opção pela comercialização direta obriga o operador da usina a se comprometer durante o mês inteiro. Ele tem o direito de mudar da remuneração da EEG para a comercialização direta e vice-versa a cada mês, desde que o notifique antes do início do mês anterior. Exemplo: se o operador de uma usina deseja mudar para a comercialização direta em outubro de 2013, deverá comunicar o seu propósito à empresa distribuidora de energia o mais tardar no dia 31 de agosto de 2013. Se em novembro de 2013 ele deseja voltar para o modelo de remuneração pela EEG, deverá notificar a distribuidora até 30 de setembro de 2010.

O operador da usina tem a livre escolha de comercializar diretamente apenas uma parte da energia produzida em um mês, recebendo para o restante a respectiva remuneração pela EEG. Para isso, ele deve comunicar à distribuidora a porcentagem da energia total que será vendida diretamente o mais tardar antes do início do mês anterior, e nesse período deverá manter respectivos registros para posterior comprovação. A porcentagem deve ser respeitada em cada quarto de hora durante todo o mês.

7.3 Remuneração pela EEG

O direito de receber a tarifa da EEG se configura quando a eletricidade injetada na rede elétrica pública é originada exclusivamente de fontes renováveis. O direito é do operador da usina, ou seja, da pessoa que utiliza a usina para a geração de energia, seja ela ou não a sua proprietária, e implica um dever da empresa distribuidora que recebe a energia.

7.3.1 Fundamentos da determinação da remuneração

A seguir, é explicado em detalhe como se determina o valor e o período da remuneração. Primeiro serão expostos os fundamentos. Em seguida, serão explicados os conceitos de "usina" e "início de operação" como pretendido pela EEG e a sua importância para a definição do valor e duração da remuneração. Por fim, serão explicados os diferentes bônus que a EEG estipula para a conversão de biogás em energia elétrica.

7.3.1.1 Valor da remuneração

O valor da remuneração da EEG é determinado, entre outros fatores, pelo porte da usina, data da entrada em operação e fonte de energia. Além disso, a lei inclui um sistema de bônus diferenciado para incentivar o uso de determinados substratos, a adoção de tecnologias inovadoras e a utilização eficiente do calor.

Para calcular o valor da remuneração, deve-se primeiro observar o tamanho da usina de biogás: quanto maior for a potência elétrica de uma usina, menor será a remuneração para a energia elétrica gerada. Com isso, a lei visa contemplar o fato de que o custo do quilowatt-hora gerado diminui com o aumento do porte da usina. Como compensação, as pequenas usinas, consideradas pela EEG especialmente merecedoras de incentivo, recebem uma remuneração maior que as de maior porte.

Essa diferenciação conforme o tamanho da usina é realizada pela EEG por uma escala "móvel" de remuneração em função de limiares de potência determinados por lei. Sendo a potência elétrica da usina superior a um determinado limiar de potência, a remuneração se determina pela quantidade de energia gerada em proporção aos respectivos limiares de potência. A taxa média de remuneração prevista pela EEG para eletricidade de usinas de biogás se compõe da média da remuneração concedida para cada uma das frações de capacidade. Dessa forma, garante-se que a remuneração média sofra apenas uma pequena redução quando um valor-limiar for ligeiramente excedido e a operação de uma usina adaptada às condições locais seja economicamente viável.

Na atribuição da injeção de energia elétrica aos diferentes limiares de potência, não é a potência elétrica instalada da usina o fator determinante, mas sim a potência média anual. Para determinar a potência média anual, a quantidade total de energia injetada na rede de distribuição durante o exercício deve ser dividida pelo total de horas do exercício, geralmente 8.760. O efeito negativo desse cálculo é que usinas que não tenham produzido energia durante um certo período, em virtude, por exemplo, de trabalhos de manutenção, apresentam uma média de remuneração por quilowatt-hora mais elevada que se tivessem trabalhado continuamente.

7.3.1.2 Duração da remuneração

A remuneração da EEG não é por tempo indefinido, mas sim limitada a um período de 20 anos mais o período restante até o fim do ano, contado a partir da

data em que a usina entrou em operação. Se, por exemplo, uma usina iniciou as suas operações em 1º de julho de 2010, o período de remuneração se inicia nessa data e termina em 31 de dezembro de 2030. O vetor energético utilizado não tem influência sobre a data do início da operação. Se, por exemplo, uma usina começar a operar com gás natural ou óleo de aquecimento e posteriormente mudar para o biogás, o período da remuneração começa a contar já no início da operação com gás natural ou óleo de aquecimento.

O período de remuneração continua a ser contado mesmo se o operador comercializar a energia diretamente. A legislação não prevê a extensão do período legal de remuneração – desde 1º de janeiro de 2009, a EEG não mais permite zerar a data de início de operação em virtude da modernização da usina – nem mesmo por meio de investimentos adicionais consideráveis. O reinício da contagem do período de remuneração também não é possível pela troca do gerador.

Após o período legal de remuneração expirar, extingue-se o direito à remuneração da EEG. Embora ainda continue tendo a prioridade para injetar a energia na rede, o operador tem de se encarregar da sua venda.

7.3.1.3 Degressão

A remuneração válida para uma usina no ano do início da sua operação permanece fixa durante todo o período legal de remuneração.

Para usinas que entrarem em operação em um ano posterior, são aplicadas taxas de remuneração inferiores àquelas para usinas em funcionamento já desde um ano anterior. Conforme o vetor energético, a EEG prevê uma redução anual da remuneração mínima mais ou menos acentuada. O objetivo é levar em consideração tanto o aumento da lucratividade da geração de eletricidade de fontes renováveis, proporcionado pelo avanço tecnológico, como a queda do custo da matéria-prima em virtude do aumento de sua produção.

No caso da eletricidade gerada com biogás, a redução anual é de 1%, a mais baixa na escala de degressividade. Essa redução se refere tanto à remuneração básica quanto aos bônus. Contudo, ela serve como incentivo para que o operador coloque a sua usina de biogás em operação antes do fim do ano considerado. Há que se considerar, porém, se vale a pena iniciar as operações da usina pouco antes da virada do ano. Por um lado, obtém-se a vantagem econômica de se evitar a degressividade. Por outro lado, há a desvantagem de o tempo restante até o fim do ano, com remuneração me-

lhor, ser curto demais e o fato de o período de remuneração garantido pela EEG se encurtar.

Exemplo: uma usina com capacidade de 150 kW entra em funcionamento no dia 31 de dezembro de 2009, rendendo ao seu operador, conforme a remuneração básica, 11,67 centavos de euro por kWh produzido. Se iniciar as operações somente no dia 1º de janeiro de 2010, recebe um valor de apenas 11,55 centavos de euro kWh. No primeiro caso, porém, a remuneração será paga por um período de 20 anos e apenas um dia. No segundo caso, por outro lado, ela será paga durante 20 anos e 364 dias. No geral, portanto, o montante total da remuneração da EEG é maior, ainda que o valor por unidade seja menor. Considerar, porém, que a evolução dos preços da eletricidade é imprevisível. Depois de dez anos, por exemplo, possivelmente a comercialização direta poderia ser mais atraente que a remuneração da EEG, que no longo prazo deixaria de ser vantajosa.

7.3.2 Conceito de usina e início de operação – determinação correta do valor da remuneração

O conceito de usina e a data de início de operação são de importância decisiva para a determinação das taxas de remuneração.

7.3.2.1 Conceito de usina conforme a EEG

A EEG considera como "usina" toda construção para a geração de eletricidade a partir de fontes de energia renováveis, portanto todas as usinas de biogás com cogeração de energia. Ao do posicionamento da legislação anterior a 2009, não é mais necessário que a usina seja "autônoma" na geração de eletricidade a partir de fontes renováveis de energia. Isso instituiu um novo conceito de usina, conforme a nota explicativa da lei.

Do ponto de vista jurídico, não é fácil classificar configurações em que duas ou mais unidades de cogeração estão conectadas a uma usina de biogás. Apesar de a Agência de Esclarecimento EEG ter publicado uma recomendação em 1º de julho de 2010 (ref. 2009/12), ainda não existe um consenso definitivo acerca dessa questão. As exposições a seguir são opinião pessoal única e exclusiva do autor e não têm nenhum caráter de obrigatoriedade nem substituem a consultoria jurídica no caso particular.

Conforme opinião do autor, **várias usinas de cogeração** operadas no local da usina de biogás e compartilhando dos mesmos recursos para a geração de

Tabela 7.1: Taxas de remuneração para usinas de biogás inauguradas em 2011

	Potência da usina conforme o § 18 (2) da EEG	Taxas de remuneração em centavos de euro por kWh (início das operações em 2011) ^a
Remuneração básica para energia elétrica de biomassa	até 150 kW até 500 kW até 5 MW até 20 MW	11,44 9,00 8,09 7,63
Bônus de controle da poluição atmosférica	até 500 kW	+0,98
Bônus de biomassa dedicada	até 500 kW até 5 MW	+6,86 +3,92
Bônus de esterco líquido	até 150 kW até 500 kW	+3,92 +0,98
Bônus de conservação da paisagem	até 500 kW	+1,96
Bônus de cogeração	até 20 MW	+2,94
Bônus tecnológico	até 5 MW	+1,96 / +0,98 ^b

a. Conforme a nota explicativa da EEG, as taxas de remuneração nela citadas são primeiro somadas, depois reduzidas pelo fator de 1% anual, e por fim arredondadas para duas casas após a vírgula. Caso a caso, a remuneração correspondente pode divergir do total das taxas de remuneração citadas.

b. Para uma capacidade máxima de equipamentos de tratamento de gás de mais de 350 Nm₃ e no máximo 700 Nm₃ de biogás não tratado por hora.

biogás (biodigestor, depósito de biofertilizantes, etc.), ao contrário da recomendação 2009/12 da Agência de Esclarecimento EEG, não constituem usinas independentes, mas sim partes de uma usina comum, em função do conceito abrangente de usina. Conforme essa opinião, é irrelevante se os pré-requisitos adicionais do § 19 (1) da EEG são ou não satisfeitos. Assim, a capacidade média da usina, decisiva na definição do valor da remuneração, deve ser determinada com base na quantidade total de energia injetada em um exercício. Em outras palavras, na determinação da remuneração, são somadas as capacidades das usinas de cogeração, as quais invariavelmente utilizam a mesma linha para realizar a injeção na rede. Consequentemente, supondo um valor equivalente de horas de operação, uma usina de biogás com, por exemplo, um módulo de cogeração de 300 kW recebe a mesma remuneração que uma usina de biogás com dois módulos de 150 kW.

Caso especial é o das chamadas **usinas satélites de cogeração**, usinas de cogeração adicionais conectadas diretamente a uma usina de geração de biogás por meio de uma tubulação de gás bruto. Se locali-

zada a uma distância suficiente da usina de cogeração já existente na usina de geração de biogás, a usina satélite de cogeração é considerada uma usina independente. A EEG, no entanto, não menciona nenhum critério específico para avaliar se uma usina é ou não independente do ponto de vista legal. Na prática, como critério de "proximidade geográfica imediata" vem sendo cada vez mais adotado o valor de cerca de 500 m. Usinas satélites de cogeração localizadas além dessa distância devem sempre ser consideradas como usinas independentes. Essa definição, contudo, não consta de nenhum texto de lei, o que foi enfatizado pela Agência de Esclarecimento EEG em sua recomendação de 14 de abril de 2009 (ref. 2008/49). Conforme a opinião do autor, deve-se obter a opinião objetiva e imparcial de terceiros para que se chegue a uma decisão caso a caso. A utilização eficiente de calor, por exemplo, é um indício de que a usina satélite de cogeração é independente do ponto de vista legal.

Antes da construção de uma usina satélite de cogeração, deve-se esclarecer o seu status legal junto à distribuidora.

7.3.2.2 Agrupamento de usinas

Conforme o caso, para fins da determinação da remuneração, consideram-se várias usinas de biogás como sendo uma só, embora sejam usinas independentes de acordo com o conceito de usina acima explicado.

O objetivo dessa regra é coibir abusos no projeto das usinas, evitando que, movidos unicamente pelo intuito de aumentar a remuneração, investidores construam duas ou mais usinas pequenas em vez de uma usina potencialmente maior e economicamente mais eficiente. A razão disso é que, em função das taxas de remuneração móveis, várias usinas pequenas têm direito a receber uma remuneração significativamente maior que uma usina grande (cf. 7.3.1.1).

O agrupamento em uma única usina se realiza conforme pré-requisitos claros previstos na EEG. Preenchidos esses pré-requisitos, é concretizado o agrupamento de várias usinas.

Ao ser determinada a remuneração, várias usinas de biogás independentes são agrupadas em uma usina conforme o § 19 (1) da EEG, independentemente da situação de propriedade, se:

- elas foram construídas no mesmo terreno ou com proximidade geográfica imediata,
- elas produzem eletricidade do biogás ou biomassa,

- a eletricidade gerada em cada uma das usinas de biogás for remunerada em dependência da potência da usina conforme a EEG, e
- as usinas de biogás entraram em operação num espaço de doze meses consecutivos.

Conforme o texto do § 19 (1) da EEG, o agrupamento serve para o cálculo da remuneração somente do último gerador que entrou em operação. Geralmente, o gerador corresponde à usina de cogeração.

Exemplo: no caso de três usinas agrupadas com fins de cálculo da remuneração, o direito à remuneração da primeira usina colocada em operação permanece intacto mesmo após a entrada em operação da segunda usina.

Na determinação do direito à remuneração da segunda usina, por outro lado, se os pré-requisitos legais do § 19 (1) da EEG forem preenchidos cumulativamente, ambas as usinas serão agrupadas.

Também o direito à remuneração da segunda usina permanece intacto na entrada em operação da terceira usina. Para a determinação da remuneração da terceira usina de biogás, as três usinas são consideradas como uma única usina se forem satisfeitos os pré-requisitos legais.

O § 19 (1) da EEG tem efeito tanto sobre o direito à remuneração básica como sobre o direito a aqueles bônus cujos valores também estão associados a determinados limiares de potência. Esse é o caso dos bônus de controle da poluição atmosférica, biomassa dedicada, dejetos líquidos, conservação da paisagem e tecnologia.

7.3.2.3 Exemplos de configurações de usinas

Os exemplos a seguir servem como referência de como as diferentes configurações de usinas têm impacto sobre o seu status e a remuneração correspondente. A avaliação de cada exemplo reflete unicamente a visão pessoal do autor, não tendo validade genérica, e não substitui a consultoria jurídica caso a caso.

Exemplo 1: uma usina de biogás é composta de um biodigestor, um pós-digestor, um depósito de biofertilizantes e várias unidades de cogeração operando no próprio local.

Conforme a visão do autor, essa configuração constitui uma única usina, independentemente do número de unidades de cogeração e do momento da entrada em operação. Conforme a interpretação da Agência de Esclarecimento EEG, porém, isso vale somente se as unidades de cogeração tiverem sido colocadas em operação em um espaço de 12 meses consecutivos (§ 19 (1) da EEG).

Exemplo 2: uma usina de biogás está conectada por tubulações de gás bruto com duas unidades de cogeração localizadas nas imediações do local da usina, e a uma terceira unidade à distância de 150 m, em uma área adjacente à área em que se localiza a usina. Todas as unidades de cogeração iniciaram a operação no ano de 2009.

Nesse caso, as duas primeiras unidades de cogeração são contadas como uma única usina, como no exemplo 1. Essa usina deve ser remunerada juntamente com a terceira unidade de cogeração, pois esta não é uma usina independente. A separação espacial e funcional da usina de biogás não é suficiente.

Exemplo 3: uma usina de biogás está conectada por meio de tubulação de gás bruto com duas unidades de cogeração diretamente no local da usina de biogás, e conectada a uma terceira unidade de cogeração, localizada a 800 m de distância em uma área não adjacente. A terceira unidade de cogeração se encontra em uma localidade próxima, cujas residências são aquecidas com o calor residual. Todas as unidades de cogeração iniciaram a operação no ano de 2009.

Também nesse caso, as duas primeiras unidades de cogeração são consideradas como uma usina. Diferentemente do exemplo 2, a terceira unidade de cogeração é considerada como usina independente em função da separação espacial e funcional. Temos assim duas usinas: a usina de biogás com duas unidades de cogeração, e a terceira unidade de cogeração separada. O agrupamento das três usinas conforme o § 19 (1) da EEG não se aplica, pois a terceira unidade de cogeração não tem "proximidade geográfica imediata" à usina principal.

Exemplo 4: dez usinas de biogás, dotadas cada uma de um biodigestor, um pós-digestor, um depósito de biofertilizantes e uma unidade de cogeração de igual potência, e sem ligação de nenhum tipo entre si, se encontram distribuídas em uma área parcelada e a uma distância de 20 m entre si. Todas as usinas de biogás iniciaram a operação no ano de 2009.

Nesse caso, cada uma das usinas de biogás constitui uma usina completa e independente, conforme o § 3 n° 1 da EEG. A título de cálculo da remuneração, no entanto, as usinas de biogás são agrupadas conforme o § 19 (1) da EEG, uma vez que se encontram em proximidade geográfica imediata entre si e entraram em operação em um espaço de 12 meses consecutivos.

De forma geral, o § 19 (1) da EEG também se aplica a usinas que entraram em funcionamento antes de 2009. Com isso, desde então sobretudo os agrupamentos de usinas de biogás tiveram de enfrentar fortes

quedas em sua remuneração. Em função do § 66 (1a), incluído em 1º de janeiro na EEG, as usinas que já operavam como usinas modulares antes de 1º janeiro de 2009 são consideradas como usinas independentes, apesar do § 19 (1) da EEG. Conforme a nota explicativa da lei, os operadores de tais usinas podem exigir o montante total da remuneração retroativamente até 1º de janeiro de 2009. Anteriormente, vários operadores de usina entraram com recurso constitucional contra a aplicação do § 19 (1) da EEG sobre usinas antigas e, não tendo obtido êxito, pediram liminar junto ao Tribunal Constitucional Federal da Alemanha.

7.3.2.4 Momento do início de operação

Além da potência da usina, o ano em que a usina entra em operação também é fundamental para a determinação da remuneração, uma vez que a taxa de remuneração decresce a cada ano subsequente de operação, em função da degressividade (ver acima 7.3.1.3).

Segundo a EEG, uma usina entra em operação quando é ligada pela primeira vez após o estabelecimento de sua prontidão técnico-operacional. Desde 1º de janeiro de 2009, é indiferente se o gerador da usina já entra em operação com fontes de energia renováveis ou inicialmente – durante a partida, por exemplo – é abastecido por combustíveis fósseis. A injeção de energia elétrica na rede de distribuição não é obrigatória para a entrada em funcionamento, desde que a usina esteja pronta para funcionar e o operador da usina tenham empreendido tudo o que for necessário para permitir a injeção da energia na rede. A operação de teste não constitui uma entrada da usina em operação.

Se um gerador que já esteve em funcionamento for posteriormente transferido para outro local, isso não altera o momento do início de operação. Mesmo que um gerador usado seja instalado em uma nova usina de cogeração, esta terá como momento de início de operação a data em que o gerador usado entrou em funcionamento. Como consequência, o período de remuneração é reduzido de acordo com a EEG.

7.3.3 Pormenores da remuneração

A seguir são apresentados os diferentes bônus e a remuneração básica, bem como os respectivos pré-requisitos. A tabela 7.1 contém uma visão geral dos valores de remuneração para usinas de biogás inauguradas em 2011.



7.3.3.1 Remuneração básica

Na conversão do biogás em eletricidade, as usinas de biogás que entraram em funcionamento em 2011 têm direito à remuneração básica de 11,44 centavos de euro por quilowatt-hora até uma potência de 150 kW, 9,00 centavos de euro por quilowatt-hora até uma potência de 500 kW, 8,09 centavos de euro por quilowatt-hora até uma potência de 5 MW e 7,63 centavos de euro por quilowatt-hora até uma potência de 20 MW inclusive.

O cálculo da remuneração básica é ilustrado com o seguinte exemplo: A unidade de cogeração de uma usina de biogás inaugurada em 2011 tem uma capacidade elétrica instalada de 210 kW. No ano de 2011, a unidade de cogeração atinge 8.322 horas de operação em carga máxima. De acordo com a EEG, a potência média anual é portanto igual a 200 kW. Devido à remuneração móvel, $\frac{3}{4}$ da eletricidade (150 kW de 200 kW) são remunerados com 11,44 centavos de euro por quilowatt-hora e $\frac{1}{4}$ (50 kW de 200 kW) com 9,00 centavos de euro por quilowatt-hora. A remuneração básica média, portanto, resulta em aproximadamente 10,83 centavos de euro quilowatt-hora.

O pré-requisito para o direito à remuneração básica é que a eletricidade seja gerada a partir de biomassa, como entendida pelo Regulamento Alemão de Biomassa (BiomasseV). Esse regulamento define a biomassa como sendo um vetor energético que consiste em massa vegetal ou animal, bem como resíduos e subprodutos que consistem de massa vegetal ou animal. O gás gerado a partir de biomassa também é considerado como biomassa.

Todos os substratos comuns utilizados em usinas de biogás se enquadram na definição de biomassa. Contudo, observar que, conforme estipula o § 3 do BiomasseV, alguns tipos de biomassa não são considerados como biomassa. Exemplos são determinados subprodutos de origem animal, lodo, gases do tratamento de efluentes e de aterros sanitários.

Desde 2009, em usinas sujeitas à EEG é permitido o uso também de substâncias que, embora não aprovadas pelo BiomasseV, são consideradas como biomassa em sentido amplo (exemplo: lodo). A remuneração, no entanto, se aplica apenas à energia elétrica que proporcionalmente for gerada pela biomassa como entendida pelo BiomasseV.

Segundo a nota explicativa da lei, contudo, essa flexibilização do denominado "princípio de exclusividade" não se aplica à produção de biogás propriamente dita: como, para se qualificar ao pagamento da remuneração, o próprio biogás utilizado deve ser uma

biomassa na acepção do § 27 (1) da EEG, deve atender aos requisitos da BiomasseV. Por essa razão, o biogás propriamente dito deve ser gerado exclusivamente de biomassa como definida no BiomasseV. Subsequentemente, para a geração de eletricidade pode ser utilizado o biogás juntamente com outra "biomassa em sentido amplo", por exemplo gás do tratamento de efluentes (cf. § 3 n° 11 do BiomasseV).

Desde 1° de janeiro de 2009, a remuneração da EEG pela injeção de energia por usinas de maior porte geralmente está associada à cogeração de eletricidade e calor. De acordo com essa alteração da lei, a eletricidade de usinas de biogás com potência superior a 5 MW só são merecedoras da remuneração se forem geradas com o aproveitamento simultâneo do calor. Essa restrição tem como objetivo incentivar os operadores a construir grandes usinas de biogás somente nas proximidades de consumidores de calor.

7.3.3.2 Bônus para a utilização de biomassas dedicadas

A EEG concede um bônus para o uso de recursos renováveis (em alemão denominados de NawaRo; também referidos como culturas energéticas ou biomassas dedicadas) que visa compensar o fato de a utilização de matérias de origem unicamente vegetal ser mais cara que o uso de biomassa oriunda, por exemplo, de resíduos. Assim, pretende-se a otimização do aproveitamento da biomassa gerada em atividades agrícolas, silviculturais e horticultrais, especialmente em usinas menores, em que uma operação à base de biomassas dedicadas seria economicamente inviável sem incentivos.

Um exame mais detido mostra que o bônus NawaRo é na realidade constituído de vários bônus – em parte estruturados conforme a potência da usina – que dependem do substrato utilizado e do tipo de geração de eletricidade.

As biomassas dedicadas são definidas pelo n° II 1 do Anexo 2 da EEG como

"plantas ou partes de plantas originadas em atividades agrícolas, silviculturais, horticultrais ou de conservação da paisagem que não foram submetidas a tratamento e alteração que não aqueles visando a colheita, conservação ou utilização em usinas de biomassa".

O esterco líquido tem o mesmo status que as biomassas dedicadas.

A compilação (incompleta) de substratos considerados biomassas dedicadas se encontra em uma lista positiva. Além disso, a EEG também contém uma lista negativa completa de substratos não considerados

Tabela 7.2: Produção de biogás padrão de subprodutos de origem vegetal, conforme a lista positiva da EEG (seleção)^a

Subproduto de origem vegetal	Produção padrão conforme it. V do Anexo 2 da EEG	
	[kWh _{el} /t MF]	[Nm ³ CH ₄ /t MF]
Bagaço do malte (fresco ou prensado)	231	62
Resíduos de hortaliças	100	27
Glicerol do processamento de óleos vegetais	1.346	364
Cascas de batata	251	68
Bagaço de frutas (fresco, não tratado)	187	51
Farelo de canola	1.038	281
Torta de canola (teor residual de óleo aprox. 15%)	1.160	314

a. O resumo completo se encontra na tabela 4.5, no capítulo 4.

como biomassa dedicada e cujo uso não qualifica ao pagamento do bônus NawaRo.

Bônus NawaRo geral

O bônus NawaRo geral é concedido a usinas com capacidade de até 5 MW. Seja qual for o tipo de biomassa dedicada utilizada, usinas inauguradas no ano de 2011 receberam um bônus de 6,86 centavos de euro por quilowatt-hora para uma capacidade de até 500 kW e 3,92 centavos de euro por quilowatt-hora para uma capacidade superior a 500 kW.

A concessão do bônus NawaRo geral, além de ter como condição o uso de matérias-primas exclusivamente renováveis e subprodutos de origem vegetal, exige ao operador da usina que mantenha um diário com dados sobre o tipo, quantidade e origem da biomassa utilizada. Além disso, o operador não pode manter na mesma área outra usina de biogás que utilize matérias-primas não renováveis.

A conversão em eletricidade também admite o uso de determinados subprodutos vegetais, além das biomassa dedicada e do esterco líquido. Os subprodutos são citados em uma lista positiva completa e abrangem, p. ex., polpa ou casca de batata, bagaço do malte e grãos destilados de cereais. O direito ao bônus NawaRo, porém, se aplica somente à proporção da energia elétrica efetivamente produzida a partir de biomassa dedicada ou esterco líquido. A proporção de eletricidade qualificada ao bônus deve ser determinada com base no padrão de rendimento de biogás legalmente estipulado para os subprodutos unicamente vegetais e comprovada por um especialista ambiental.

O Anexo 2 da EEG contém a visão geral com todas as listas de matérias-primas para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis (lista positiva de biomassas dedicadas, lista negativa de biomassas dedicadas e lista positiva de subprodutos puramente vegetais).

Caso a usina precise de uma licença de controle de emissões para produzir eletricidade a partir do biogás, a concessão do bônus NawaRo exigirá também que o depósito de biofertilizantes tenha uma cobertura impermeável a gás, e que existam dispositivos adicionais de queima de gás para o caso de falhas ou superprodução. De acordo com o texto do Anexo 2, número I. 4 da EEG, no entanto, somente os depósitos de biofertilizantes já construídos devem receber a cobertura. A existência de um depósito de biofertilizantes, porém, não é um pré-requisito para o bônus NawaRo. Não há um consenso sobre se devem ser cobertos com impermeabilidade a gases aqueles depósitos de biofertilizantes utilizados pelo operador da usina de biogás, mas que dela não fazem parte, ou dos quais não são esperadas emissões de metano em função do tempo de retenção precedente em outros reservatórios. Devido à falta de uma regulamentação de transição, os requisitos adicionais também se aplicam a usinas que entraram em operação antes de 1º de janeiro de 2009. Nos casos em que a instalação posterior de um equipamento de cobertura desse tipo ocasionar custos dificilmente refinanciáveis pelo operador da usina antiga, tal medida pode ser vista como desproporcional e ilícita (cf. outros aspectos técnicos do armazenamento de biofertilizantes, capítulo 3.2.3).

Bônus de esterco líquido

Além do bônus NawaRo geral, a conversão de biogás em eletricidade também está qualificada a receber um bônus pelo uso de esterco líquido como matéria-prima. O bônus de esterco líquido visa permitir que empresas agrícolas explorem melhor o potencial do esterco existente, contribuindo para que se reduza nos campos a deposição do esterco líquido não tratado, o qual emite metano. Esse bônus é destinado somente a usinas com capacidade de até 500 kW_{el}. Essa restrição pretende inibir o transporte de grandes quantidades de esterco por grandes distâncias ("turismo do esterco").

Nesse sentido, conforme a aceção do regulamento (CE) nº 1774/2002/CE (EU-HigieneV), esterco líquido são:

"Excrementos e/ou urina de animais de interesse econômico, com ou sem cama, bem como guano, não processados, ou processados em conformidade com o capítulo II

do anexo VIII, ou convertidos de alguma forma em usinas de biogás ou compostagem”.

O bônus de esterco líquido é estruturado em uma escala móvel: para usinas de biogás inauguradas em 2011 e com potência de até 150 kW, o bônus monta a 3,92 centavos de euro por quilowatt-hora. Para potências superiores de até 500 kW, ele remunera o quilowatt-hora com 0,98 centavos de euro. Usinas com uma potência ainda maior têm a possibilidade de receber o bônus de esterco líquido proporcionalmente.

Para que a usina seja qualificada para o bônus, a proporção de esterco no substrato utilizado para a produção de biogás deve ser de no mínimo 30% em massa. A proporção do esterco se calcula pelo fluxo de biomassa na usina e a determinação da massa se dá por pesagem.

O limiar de 30% em massa deve sempre ser respeitado. Essa proporção mínima pode ser continuamente comprovada pelo diário de biomassa utilizada que o operador deve manter. A comprovação deve ser apresentada anualmente o mais tardar até o dia 28 de fevereiro do ano seguinte sob a forma de um parecer de um especialista ambiental, que utiliza os dados do diário de biomassa em sua elaboração.

As usinas que obtêm o **gás de uma rede de distribuição** para convertê-lo em eletricidade não têm direito ao bônus de esterco líquido. Isso se refere particularmente à obtenção de gás natural, classificado como biometano, de redes de distribuição de gás (cf. detalhes em 7.4). Essas usinas que operam na base do intercâmbio de gás estão restritas ao bônus NawaRo geral de até 7,0 centavos de euro por quilowatt-hora. Na visão do autor, porém, essa regra de exclusão não deve contemplar usinas de geração de eletricidade que recebem o biogás diretamente da usina de geração de gás por meio de uma microtubulação de gás (cf. 7.3.2.1). A sistemática da lei EEG está em seu favor, pois tais usinas não obtêm da tubulação o gás natural classificado como biometano, mas sim o biogás "genuíno", de modo que, em absoluto, não teria sido necessária a referência à ficção jurídica do § 27 (2) do nº VI. 2. b) linha 3 do Anexo 2 da EEG. Além do mais, uma única tubulação de gás não constitui uma rede de gás na acepção do nº VI. 2. b) linha 3 do Anexo 2 da EEG. Caso contrário, a exceção sempre se aplicaria – desde que sujeita a uma diferenciação legal imprecisa conforme o comprimento das tubulações – e perderia o caráter de uma regra de exceção, uma vez que toda a usina de cogeração com biogás está ligada ao biodigestor por meio de uma tubulação de gás.

Bônus de conservação da paisagem

Também parte do grupo de bônus NawaRo, o bônus de conservação da paisagem remunera as atividades de desbaste, corte e poda. Se na usina de biogás forem utilizadas predominantemente plantas e partes de plantas produzidas em atividades de conservação, a remuneração regulamentada se eleva em 1,96 centavos de euro por quilowatt-hora para usinas postas em operação no ano de 2011. Este bônus também é concedido para uma potência máxima de 500 kW. Usinas com maior capacidade têm direito a receber o bônus proporcionalmente.

As atividades de conservação geram restos que não podem ser utilizados diretamente de outra forma e, portanto, não podem ser exploradas comercialmente, constituindo um subproduto indesejável da conservação. Com o bônus de conservação da paisagem, a lei cria uma alternativa para aproveitar esses restos e ao mesmo tempo contribuir para a redução da concorrência pelo uso da terra na área de produção da biomassa.

Determinados requisitos desse novo bônus de conservação da paisagem ainda são controversos (cf. 4.5). Em setembro de 2009, a Agência de Esclarecimento EEG concluiu o processo de recomendação 2008/48 sobre o bônus de conservação da paisagem. A agência defende uma interpretação abrangente do conceito de atividade de poda, desbaste e corte. Para avaliar se o critério da "predominância" se aplica, ou seja, mais que 50% do material é de origem em atividades de conservação, toma-se o peso da matéria fresca como critério determinante.

Diferentemente do bônus de esterco líquido, a EEG não exige explicitamente que os requisitos sejam cumpridos o tempo todo para que a usina esteja apta a receber o bônus de conservação da paisagem. Assim, basta que o balanço no fim do ano seja suficiente para cobrir a proporção mínima.

7.3.3.3 Bônus de controle da poluição atmosférica

Na alteração de 1º de janeiro de 2009, foi incluída pela primeira vez na EEG um bônus de controle da poluição atmosférica para usinas de biogás. Com isso, a lei pretende diminuir as emissões de formaldeídos, substâncias cancerígenas originadas na combustão do biogás em usinas de cogeração. Por isso, o bônus é por vezes denominado "bônus do formaldeído". Esse incentivo promove o uso de motores com baixas emissões e a atualização dos sistemas com catalisadores.

Para usinas de biogás operando desde 2011 e com até 500 kW de capacidade, a remuneração básica aumenta em 0,98 centavos de euro por quilowatt-hora se as emissões de formaldeído não forem maiores que os valores estipulados por lei. Excluídas do bônus estão as usinas que convertem em eletricidade o biometano "virtual". Conforme a EEG, esse tipo de metano é injetado na rede em um ponto e dela retirado em outro ponto.

Além disso, o direito ao bônus se limita àquelas usinas de biogás passíveis de serem licenciadas conforme a Lei Alemã de Proteção contra Emissões (BImSchG). De acordo com a BImSchG, a licença é necessária especificamente para as usinas com potência térmica nominal superior a 1 MW. Se a usina tiver uma potência térmica nominal mais baixa, só em determinados casos deverá ser licenciada conforme os critérios da BImSchG (maiores informações no capítulo 7.5.1). Se a usina estiver sujeita à licença de construção, mas não à licença conforme a Lei Alemã de Proteção contra Emissões, o operador não terá direito ao bônus do formaldeído.

O bônus também é exigível por operadores cuja usina entrou em funcionamento antes de 1º de janeiro de 2009. O texto do regulamento de transição de EEG é inequívoco e deixa clara a validade do bônus também para aquelas usinas antigas que necessitam da autorização referente à BImSchG.

O que não é claro são os valores de emissões que qualificam uma usina a receber o bônus. Segundo a lei, devem ser respeitados os "valores-limite de formaldeído correspondentes ao preceito da mitigação de emissões da Diretriz Técnica Alemã para o Controle da Poluição Atmosférica (TA Luft)". Os valores-limite determinantes são estipulados pela autoridade que emite a notificação da licença exigida pela legislação de proteção contra emissões. Ela se orienta pelos valores de emissões da TA Luft, segundo os quais a proporção de formaldeído no gás de combustão não pode ultrapassar a concentração em massa de 60 mg/m³, mas também deve observar o preceito da mitigação de emissões. Em virtude desse preceito, a autoridade pode, caso a caso, estipular valores de emissões menores e/ou impor ao operador medidas adicionais concretas para a redução de emissões. Essas considerações sugerem que os valores-limite estipulados na notificação da licença também são decisivos para o direito do operador da usina ao bônus. Conforme uma decisão do Grupo de Trabalho da Federação/Estados para a Proteção contra Emissões (LAI), de 18 de setembro de 2008, a notificação para a comprovação do cumprimento dos valores-limite so-

mente é emitida pela autoridade se as emissões de formaldeído forem de no máx. 40 mg/m³.

A comprovação do cumprimento dos valores-limite se dá pelo certificado da autoridade competente conforme a legislação de proteção contra emissões do Estado federado. O operador recebe o certificado oficial de que são cumpridos os valores-limite de formaldeído da TA Luft, conforme o preceito de mitigação de emissões, após apresentar o relatório de emissões junto à autoridade competente. O certificado pode então ser apresentado como comprovante à distribuidora.

7.3.3.4 Bônus de cogeração

A EEG aposta no bônus de cogeração como um grande incentivo financeiro para o uso do calor produzido na geração de eletricidade. O aproveitamento do calor aumenta a eficiência energética total da usina de biogás e pode contribuir para a redução da queima de combustíveis fósseis. A alteração da EEG aumentou o bônus de 2,0 para 3,0 centavos de euro por quilowatt-hora, tornando o incentivo ainda mais atraente (usinas com entrada em funcionamento em 2009). Ao mesmo tempo, as exigências quanto ao aproveitamento do calor tornaram-se mais rigorosas para garantir o uso racional do calor.

Para ter direito ao bônus, a usina tem de gerar eletricidade por meio de usina de cogeração, e utilizar uma solução adequada de aproveitamento do calor gerado.

No que toca à geração de energia elétrica em usina de cogeração, a EEG remete à Lei de Geração Combinada de Energia e Calor (KWKG). De acordo com essa lei, a usina tem de ser capaz de converter simultaneamente a energia em eletricidade e calor aproveitável. Para usinas de cogeração fabricadas em série e com potência de até 2 MW, o cumprimento desse pré-requisito pode ser comprovado pela documentação apropriada fornecida pelo fabricante, na qual constam as potências térmica e elétrica, bem como a razão potência/calor. Usinas com potência superior a 2 MW têm de comprovar que preenchem os requisitos da folha de processo FW 308 do AGFW (Grupo de Trabalho para o Aproveitamento de Calor e Energia Térmica).

Conforme as disposições da EEG, o calor é racionalmente aproveitado quando é utilizado conforme a lista positiva (cf. nº III do Anexo 3 da EEG). Entre outros pontos, a lista positiva registra o abastecimento de determinados edifícios com o uso de no máximo 200 kWh por ano por m² de área utilizada, a injeção



em uma rede de distribuição de calor que cumpra determinados requisitos, e a utilização de calor de processos em determinados processos industriais. Uma série de questões legais referentes a utilizações específicas citadas na lista positiva ainda não foram respondidas.

A lista negativa (nº IV. do Anexo 3 da EEG) contém usos não permitidos do calor, tais como o aquecimento de certos tipos de construções sem isolamento e o uso da energia térmica em processos ORC ou processos com o ciclo Kalina. A lista negativa é completa e contém todos os usos não permitidos do calor. A exclusão do bônus de cogeração no uso do calor em **módulos ORC ou do ciclo Kalina**, como estipulado no nº IV.2 do Anexo 3 da EEG, só diz respeito, porém, ao uso proporcional do calor residual de uma usina de cogeração em um chamado módulo de conversão posterior de energia; tal uso do calor desabilita ao bônus, uma vez que a usina de cogeração e o módulo de conversão posterior de energia normalmente constituem uma usina completa conforme o § 3 (1) da EEG e, portanto, o uso do calor no módulo não representa um aproveitamento fora da usina. Se, no entanto, o calor residual originalmente produzido na usina de cogeração, após atravessar o processo de conversão posterior de energia, for utilizado para uma outra finalidade que conste da lista positiva, segundo o entendimento do autor o bônus de cogeração deve ser concedido tanto para o módulo de conversão posterior como para a eletricidade gerada na usina de cogeração. A classificação da energia elétrica gerada na usina de cogeração como energia de cogeração não entra em conflito com o nº IV.2 do Anexo 3 da EEG, já que a fração do calor consumido no processo de conversão posterior não é utilizada na determinação da quantidade de calor utilizada externamente. A restrição do direito ao bônus de cogeração à eletricidade gerada no módulo de conversão posterior, no entanto, ocasionaria uma penalidade infundada às usinas que utilizam a conversão posterior além da geração de força e calor.

Em determinadas circunstâncias, o operador tem a possibilidade de receber o bônus mesmo que o uso que fizer do calor não esteja na lista positiva. Para isso, ele tem de satisfazer às três condições seguintes:

- a destinação prevista do calor não consta da lista negativa,
- o calor gerado substitui o calor de vetores energéticos fósseis em valor equivalente, ou seja, no mínimo 75%, e

- o fornecimento de calor origina custos adicionais de no mínimo 100 € por kW de potência térmica.

A lei não deixa clara a definição do requisito de "substituição". Em edifícios novos que nunca utilizaram o calor que não o fornecido pela usina de cogeração, as fontes de energia fóssil não podem ser substituídas de fato, mas sim apenas potencialmente. Dessa forma, parte-se do pressuposto de que a substituição potencial é suficiente. O operador da usina, assim, tem de mostrar que se a usina de cogeração não fornecesse o calor a esses consumidores, energias fósseis teriam de ser utilizadas.

Os custos adicionais são aqueles relativos a trocadores de calor, geradores de vapor, tubulações e equipamentos similares, mas não incluem o aumento dos custos com combustíveis.

O uso do calor conforme a lista positiva ou da substituição de energias fósseis, e os custos adicionais de investimento necessários, devem ser comprovados pelo parecer de um especialista ambiental.

Checklist "bônus de cogeração"

1. energia elétrica em usina de cogeração proporcional
2. a utilização do calor
 - a) Não consta da lista negativa
 - b) Lista positiva
 - aquecimento de edifícios conforme o regulamento de economia de energia com uso de até 200 quilowatts-hora de calor por ano, por metro quadrado de área útil,
 - injeção de calor em rede de distribuição de comprimento mínimo de 400 metros e com perdas abaixo de 25% da demanda útil de calor,
 - uso do calor em determinados processos industriais e fabricação de pellets de madeira como combustível,
 - aquecimento de instalações de criação de aves,
 - aquecimento de estábulos com os seguintes limites máximos:
 - engorda de aves: 0,65 quilowatts-hora/animal,
 - criação de porcas: 150 quilowatts-hora/porca por ano e 7,5 quilowatts-hora/leitão,
 - criação de leitões: 4,2 quilowatts-hora/leitão,
 - engorda de suínos: 4,3 quilowatts-hora/porco de engorda
 - aquecimento de estufas para o cultivo e reprodução de plantas e cumprimento dos pré-requisitos em c)
 - uso do calor de processo no tratamento de biofertilizantes visando a produção de adubo.
 - c) Alternativa a b): substituição de no mínimo 75% das fontes de energia fóssil e custos adicionais de no mínimo 100 € por kW de potência térmica

7.3.3.5 Bônus de tecnologia

O bônus de tecnologia é um incentivo ao uso de tecnologias e equipamentos inovadores caracterizados por alta eficiência energética e seguros ao clima e meio ambiente.

O bônus gratifica o uso de biogás refinado à qualidade de gás natural e também a adoção de equipamentos de geração de eletricidade com alta tecnologia. O tratamento do biogás é fomentado se

- no máximo 0,5% de emissões de metano ocorrerem no tratamento,
- o consumo de energia elétrica para o tratamento for de no máximo 0,5 kWh por Nm₃ de gás na forma bruta,
- todo o calor de processo para o tratamento e geração do biogás tiver origem em fontes renováveis de energia, ou for utilizado o próprio calor residual da usina, e
- o equipamento de tratamento de biogás tiver uma capacidade máxima de 700 Nm₃ de gás tratado por hora.

O bônus de tecnologia para toda a energia elétrica produzida a partir do gás gerado em tais estações de tratamento de gás corresponde a 2,0 centavos de euro kWh para estações com capacidade máxima de 350 Nm₃ por hora e 1,0 centavo de euro kWh para capacidades de até 700 Nm₃ por hora.

O Anexo 1 da EEG contempla, entre outras, as seguintes tecnologias inovadoras para a geração de energia elétrica a partir do biogás: células de combustível, turbinas a gás, motores a vapor, sistemas com ciclo orgânico de Rankine, instalações multicombustível, equipamentos com processo do ciclo Kalina e motores Stirling. Além disso, também recebem fomento a conversão termoquímica de palha e equipamentos para a digestão exclusiva de resíduos orgânicos com pós-compostagem.

O bônus de fermentação a seco não é mais concedido para usinas que entraram em operação após 31 de dezembro de 2008, pois muitas usinas desse tipo não atendem aos requisitos da legislação quanto ao uso de processos inovadores e compatíveis com o meio ambiente.

O pré-requisito para o incentivo das técnicas e processos mencionados é que apresentem uma eficiência elétrica de no mínimo 45% ou que seja utilizado calor ao menos temporariamente e até um determinado grau.

Geralmente, o bônus do uso de equipamentos de alta tecnologia é de 2,0 centavos de euro/kWh. O bônus é sempre concedido para a proporção de eletricidade

Checklist "comprovantes"

- Bônus de cogeração
A partir de 2 MW de potência: comprovação anual, por um especialista ambiental, da geração de eletricidade em sistema combinado de energia elétrica e calor
Até 2 MW de potência: comprovação única da geração de eletricidade, em sistema combinado, por meio da apresentação da documentação do fabricante
Comprovação de um especialista ambiental de que o calor é utilizado conforme a lista positiva, ou energias fósseis são substituídas em 75%, originando custos adicionais que montam 100 € por kW de potência térmica.
- Bônus de biomassa dedicada
Diário de matéria-prima com informações e comprovantes sobre o tipo, quantidade e unidade, bem como origem das substâncias
Comprovante da proporção de subprodutos vegetais emitida por um especialista ambiental
- Bônus de esterco líquido
Comprovante de um especialista ambiental de que a usina utiliza continuamente no mínimo 30% em massa de esterco
- Bônus de controle da poluição atmosférica
Certificado, emitido pela autoridade competente, da conformidade aos valores-limite de formaldeído
- Bônus de tecnologia
Comprovação dos pré-requisitos para o tratamento do gás conforme o nº I. 1 a) - d) do Anexo
- Bônus de conservação da paisagem
Comprovação, por especialista ambiental, da proporção de material oriundo de poda, desbaste e corte sobre a massa total

idade que se baseia no uso dessas tecnologias e processos. Se em uma usina de cogeração também for gerada energia elétrica por meio de outros processos que não se enquadram nos requisitos, o operador da usina não recebe o bônus de tecnologia para essa parte.

7.4 Tratamento de gás e injeção

Do ponto de vista econômico e ecológico, nem sempre é recomendável utilizar o biogás no local em que é gerado, ou seja, nas proximidades da usina de biogás. A geração de eletricidade sempre produz calor que muitas vezes não pode ser aproveitado no local da usina. Por isso, conforme a situação pode ser vantajoso separar fisicamente a geração da utilização do biogás. Além da construção de um gasoduto de gás bruto, o qual permite o transporte do biogás a distâncias de algumas centenas de metros até vários quilômetros para ser usado em uma usina satélite (cf. 7.3.2.1), é possível tam-

Subsídios de amortização para projetos de injeção de gás

Estações de tratamento e injeção de gás estão habilitadas a receber determinados incentivos, conforme o Programa de Incentivo ao Mercado (MAP, do alemão Marktanzreizprogramm). Segundo o nº 14.1.5 b) das Diretrizes para o Incentivo a Medidas de Utilização de Energias Renováveis no Mercado de Energia Térmica (MAP), de 20 de fevereiro de 2009, as emissões de metano na atmosfera geradas durante o tratamento podem atingir no máximo 0,5%, e o consumo de eletricidade no tratamento e injeção do gás bruto pode ser no máximo de 0,5 kWh/Nm₃. Além disso, deve-se comprovar se a energia térmica de processo fornecida tem origem em fontes renováveis (ou gás de fossas). Para equipamentos com capacidade de até 350 m³/h de biogás bruto tratado ("biometano"), o subsídio de amortização é de até 30% dos custos líquidos de investimento qualificados ao incentivo. Com prazo de validade até 31 de dezembro de 2010, esse incentivo foi mutuamente exclusivo em relação aos demais incentivos públicos. No fechamento desta edição ainda não se sabia se esse incentivo conforme o nº 14.1.5 b) seria continuado.

bém realizar o tratamento e injeção do biogás na rede pública de gás natural. Após ser injetado, o biogás pode ser retirado "virtualmente" em qualquer lugar e convertido em eletricidade em uma usina de cogeração.

7.4.1 Pré-requisitos para a remuneração da EEG

O operador da usina de cogeração que utiliza o biometano em sua usina dessa forma (ou no caso da transferência externa de biogás por uma microtubulação de gás), recebe, de forma geral, a mesma remuneração paga na conversão direta de energia no próprio local da usina de biogás. Na injeção na rede de gás natural, é pago, além disso, o bônus de tecnologia pelo tratamento do biogás: conforme o Anexo 1 da EEG, a remuneração aumenta em 2,0 centavos de euro/kWh se o biogás for enriquecido até a qualidade de gás natural e determinados pré-requisitos forem respeitados (cf. 7.3.3.5). Os bônus de controle da poluição atmosférica (cf. 7.3.3.3) e de esterco (cf. 7.3.3.2), por outro lado, não podem ser solicitados pelo operador de usinas com biogás de terceiros.

O direito à remuneração da EEG se dá conforme § 27 (3) dessa lei, embora somente para a proporção de eletricidade cogorada, ou seja, para a eletricidade que for gerada com utilização simultânea do calor conforme o Anexo 3 da EEG. Como resultado, por conseguinte, apenas usinas de cogeração com prioridade para produzir energia térmica serão beneficiadas pelo incentivo do tratamento de gás conforme a EEG.

Outro pré-requisito do direito à remuneração é que a usina de cogeração utilize unicamente o biometano. O princípio da exclusividade significa que a operação alternada com biogás e gás natural não é possível. Em vez disso, o operador da usina de cogeração deve garantir que, ao fim do ano, a quantidade efetiva de biogás, correspondente à quantidade utilizada, seja injetada em outro ponto da rede de gás e atribuída à sua usina. De outra forma, ele arrisca perder completamente o direito à remuneração da EEG.

7.4.2 Transporte do ponto de injeção até a usina de cogeração

Como o biometano se mistura ao gás natural da rede imediatamente após ser injetado, não é possível transportar o biometano fisicamente até a usina de cogeração de destino. Pelo contrário, na usina de cogeração é utilizado o gás natural comum. Do ponto de vista legal, esse gás natural usado na usina, no entanto, é tido como biogás, desde que cumpra os pré-requisitos do § 27 (2) da EEG.

O primeiro pré-requisito é que a quantidade de gás retirado corresponda, em equivalente mecânico de calor, à quantidade de gás da biomassa que foi injetada em outro ponto da rede de gás. É suficiente que as quantidades sejam correspondentes no fim do ano.

Outro pré-requisito do direito à remuneração é que a quantidade injetada de fato possa ser atribuída a uma determinada usina de cogeração. Na falta de um meio de transporte físico, a atribuição deve ocorrer obrigatoriamente por uma relação contratual entre quem injeta e o operador da usina de cogeração. Além do contrato simples de fornecimento de biometano, conforme o qual as quantidades de biometano injetadas são fornecidas ao operador da usina, também há outras relações contratuais possíveis, por exemplo o fornecimento por intermediários ou o uso de certificados cambiáveis ou de um registro central de biogás. A empresa que realiza a injeção do gás (fornecedor) tem de garantir que o caráter biogênico do biometano injetado não seja comercializado duplamente, mas sim atribuído somente à usina de cogeração.

7.4.2.1 Modelo de transporte

O fornecedor do gás pode cumprir o seu compromisso contratual de fornecimento principalmente pelo seu papel de comerciante de gás que assume o suprimento do ponto de recepção do operador da usina de cogeração. Nesse caso, não ocorre o transporte físico do biometano, mas sim o transporte virtual do ponto

de injeção ao ponto de saída, conforme as regras do comércio de gás. Para isso, o fornecedor do gás utiliza normalmente contratos do pool de contabilização de biogás. O fato de o ponto de saída da usina de cogeração estar atribuído a pool de contabilização de biogás, no entanto, não é por si uma prova de que seja utilizado exclusivamente biogás na usina de cogeração. A razão é que caso o pool de contabilização de biogás apresente um saldo negativo ao fim do ano, a distribuidora de gás não é obrigada a compensar esse saldo com biometano. Assim, os operadores de usinas têm que comprovar junto à distribuidora, também no caso de fornecimento pela empresa que realiza a injeção, que a quantidade de biogás, medida em equivalente mecânico de calor, foi injetada ao longo do ano e atribuída à usina de cogeração.

7.4.2.2 Modelo de certificados

Os fornecedores de gás, em vez de disponibilizar o biometano ao ponto de saída, também têm a opção de vender ao operador da usina de cogeração apenas o biometano, permitindo o aproveitamento de suas qualidades biogênicas. Para isso, o fornecedor comercializa o gás injetado como gás natural comum, permitindo a separação física das qualidades biogênicas do gás. Assim como no setor de energia elétrica, o caráter biogênico do gás pode ser apresentado isoladamente na forma de certificados conferidos por entidades independentes. O operador da usina de cogeração continua a comprar gás de uma distribuidora de gás natural comum e adquire somente a quantidade necessária de certificados de biometano do fornecedor. A dificuldade do modelo de certificados é que o operador da usina deve garantir que as características do gás e da usina, requisitos para o pagamento das remunerações e bônus da EEG, têm de ser suficientemente documentadas e não pode haver a possibilidade de comercialização dupla. O uso de certificados, portanto, deve ser antecipadamente combinado com a distribuidora de energia elétrica.

Com a introdução de um registro de biometano, ainda em trâmite quando da elaboração deste manual, espera-se que o comércio de biometano seja facilitado.

7.4.3 Condições legais para a conexão à rede de gás natural e utilização da rede

O tratamento e injeção de gás não impõe apenas desafios de ordem técnica, mas também quanto aos aspectos jurídicos. Apesar dos entraves, as alterações do

Regulamento de Acesso à Rede de Gás (GasNZV) e do Regulamento da Remuneração da Rede de Gás (GasNEV) melhoraram a situação significativamente. O GasNZV e o GasNEV foram alterados pela primeira vez em abril de 2008 e em seguida em julho de 2010¹.

7.4.3.1 Prioridade da conexão

Conforme a alteração do GasNZV, a distribuidora de gás tem obrigação de conectar à sua rede preferencialmente usinas de tratamento e estações de injeção de biogás. A conexão só poderá ser negada se for inviável técnica ou economicamente. Desde que a rede esteja em condições técnicas e físicas de receber os volumes de gás injetados, a distribuidora não tem o direito de negar a recepção do gás mesmo se houver o risco de gargalos na capacidade em função de contratos de transporte existentes. A distribuidora tem a obrigação de tomar todas as medidas necessárias – desde que economicamente razoáveis – para possibilitar a injeção de gás em sua rede durante o ano inteiro. Entre as medidas figura a instalação de um compressor para a reinjeção do gás a pressões mais elevadas durante os meses de verão, em que o volume injetado excede o volume de saída do respectivo trecho da rede.

7.4.3.2 Propriedade e custos de conexão à rede

No que tange à responsabilidade pelos custos de conexão à rede, a alteração do GasNZV prevê diversos privilégios para o fornecedor. Conforme a alteração do regulamento, os custos de investimento do fornecedor para a conexão, inclusive do primeiro quilômetro da linha de conexão até a rede pública de gás natural, não podem ultrapassar 250.000 €. Se o comprimento da linha de conexão for superior a 1 km, a partir deste ponto a distribuidora deve arcar com 75% dos custos adicionais, até uma distância de 10 km. A conexão à rede é de propriedade da distribuidora, que também deve arcar completamente com os custos de manutenção e operacionais. De acordo com a alteração do GasNZV, a distribuidora tem de garantir a disponibilidade mínima de 96%.

7.4.3.3 Balanço do biometano injetado

Além da atribuição de um determinado volume de gás a uma determinada usina de cogeração, decisiva para a remuneração da EEG, o gás injetado também

1. No encerramento da edição original em alemão, a alteração de julho de 2010 ainda não havia sido concluída e anunciada.

deve ser contabilizado e transportado conforme as regras do comércio de gás. Também nesse aspecto a alteração da GasNZV prevê vantagens para o fornecedor. Determinados pools de contabilização de biogás têm condições muito flexíveis de 25% e um período de contabilização de 12 meses. O uso de um pool de contabilização de biogás como esse permite, p. ex., utilizar o biogás injetado também em uma usina de cogeração com prioridade para a produção de energia térmica, sem a necessidade de reduzir o volume injetado durante o verão, conforme o modo de operação da usina de cogeração.

7.5 Utilização do calor e fornecimento

Se uma usina de cogeração com biogás for operada com calor e energia combinados, a qualificação para o bônus de cogeração (cf. pré-requisitos detalhados do bônus de cogeração) exige que o calor residual seja utilizado por meio de uma tecnologia aprovada para o aproveitamento do calor. Para exercer o direito de receber o bônus de cogeração, todas as usinas que entram em operação após o 1º de janeiro de 2009 devem comprovar a utilização do calor como previsto na lista positiva, conforme o nº III do Anexo 3 da EEG. Cumpridos os demais pré-requisitos, o direito a receber o bônus de cogeração existe independentemente de o calor ser utilizado por terceiros ou pelo próprio operador da usina.

7.5.1 Condições legais

No aproveitamento da energia térmica, na acepção do nº III. 2 do Anexo 3 da EEG (injeção na rede de distribuição térmica), são concedidos incentivos para a construção de determinados tipos de redes de energia térmica, tanto pelo **Programa de Incentivo ao Mercado** (ver 7.1) quanto pela Lei de Geração Combinada de Energia e Calor. O incentivo contempla as redes de energia térmica alimentadas, até uma determinada proporção, por calor oriundo da cogeração ou de energias renováveis. Com isso, foram firmadas as bases para que no futuro surjam cada vez mais redes de energia térmica baseadas em cogeração e redes em conformidade com a EEG.

A importância crescente das redes de aquecimento locais e distritais é reforçada na medida em que, conforme o § 16 da **Lei Alemã de Energias e Calor Renováveis (EEWärmeG)**, as administrações e associações municipais agora podem explicitamente se aproveitar de autorizações, sob a legislação estadual, para estabe-

lecer a conexão e o uso obrigatório de redes de aquecimento locais e distritais, inclusive para fins de mitigação da mudança climática e conservação dos recursos. Com isso, eliminam-se incertezas sobre se é admissível a obrigatoriedade da conexão e uso relativamente às respectivas legislações municipais. Essa disposição legal tem o propósito de encorajar os municípios a instituir regulamentos pertinentes à conexão e uso daquelas redes públicas de aquecimento em que a energia final é originada em parte ou principalmente de energias renováveis ou de usinas de cogeração.

Além disso, a EEWärmeG amplia o mercado potencial comprador de biogás e de calor produzido pela conversão de biogás em eletricidade. Proprietários de novos edifícios, cujos pedidos de alvará foram feitos após 31 de dezembro de 2008, podem satisfazer a obrigação de uso vigente desde 2009, conforme a EEWärmeG, também pela cobertura parcial da demanda de calor mediante usinas de cogeração com biogás. Se a obrigação de uso for atendida exclusivamente pela utilização de biogás, o proprietário deve cobrir no mínimo 30% da demanda de energia térmica pela aplicação de biomassa gasosa. O uso de biogás tratado e injetado para fins de abastecimento térmico, no entanto, tem de atender a determinadas exigências conforme o nº II. 1 do Anexo da EEWärmeG. Alternativamente, a obrigação de uso é considerada cumprida se a demanda de calor de um edifício for coberta por uma rede de aquecimento cujo abastecimento seja realizado, em parte significativa, por energias renováveis, por exemplo o calor residual de uma usina de cogeração movida a biogás.

Além de estabelecer a qualificação ao bônus de cogeração, o fornecimento de calor a terceiros representa também para muitos projetos um importante aspecto econômico.

7.5.2 Fornecimento de calor

O operador da usina fornece o calor para uma empresa distribuidora de calor ou diretamente para o consumidor de calor. No segundo caso, existem basicamente dois conceitos de fornecimento: no primeiro, a usina de cogeração é operada no local da usina de biogás e o calor gerado é fornecido ao consumidor mediante tubulações de calor ou uma rede de calor. No segundo conceito, mais eficiente, o biogás é transportado até o local da demanda por uma tubulação de gás bruto ou, após o devido tratamento, por meio da rede pública de gás natural. No local de demanda ele é então convertido em eletricidade. Dessa forma evitam-se perdas de calor durante o transporte.

Se o operador da usina vender a energia térmica a uma distribuidora de calor intermediária, não existirão relações contratuais entre o operador da usina e o consumidor final. O contrato é estabelecido entre a distribuidora de calor e o consumidor final. Se, no entanto, o operador da usina tiver também o papel de fornecedor do calor, fechará o contrato de fornecimento de energia térmica diretamente com o consumidor do calor. Caso o operador da usina não assumir as obrigações associadas ao fornecimento de calor, poderá transferi-las a terceiros (denominado contratante).

7.5.3 Redes de aquecimento

De forma geral, a construção de uma rede de aquecimento não exige autorização especial. A distribuidora de calor, porém, deve considerar os direitos de uso referentes ao assentamento de tubulações de calor em propriedades de terceiros. Além de fechar com o proprietário da área um contrato de uso em que é estipulado principalmente o pagamento pelo uso da terra, também se recomenda a garantia real do uso da área, por exemplo, pela instituição de regime de servidão no registro de imóveis. Isso assegura que, caso o imóvel seja vendido, o fornecedor de calor mantenha o seu direito, perante o proprietário seguinte, de utilizar a área para o transporte do calor. O assentamento de tubulações de calor ao longo de vias de circulação públicas exige que a distribuidora de calor estabeleça um contrato de uso das vias com o órgão responsável pela construção de ruas e estradas. Para isso, em certos casos é necessário o pagamento de um valor fixo ou calculado com base nos quilowatts-hora fornecidos.

7.6 Literatura recomendada

- Altrock, M.; Oschmann, V.; Theobald, C. (Hrsg.): EEG, Kommentar, 2ª ed., Munique, 2008
- Battis, U.; Krautzberger, M.; Löhr, R.-P.: Baugesetzbuch, 11ª ed., Munique, 2009
- Frenz, W.; Müggenborg, H.-J. (Hrsg.): EEG, Kommentar, Berlin, 2009
- Loibl, H.; Maslaton, M.; v. Bredow, H. (Hrsg.): Biogasanlagen im EEG, Berlin, 2009 (2ª ed.)
- Reshöft, J. (Hrsg.): EEG, Kommentar, 3ª ed., Baden-Baden, 2009
- Salje, P.: EEG - Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, 5ª ed., Colônia / Munique, 2009
- Jarass, H. D.: Bundesimmissionsschutzgesetz, 8ª ed., Munique, 2009
- Landmann/Rohmer: Umweltrecht, Volume I / II, Munique, 2009

7.7 Fontes bibliográficas

- AGFW - Arbeitsblatt FW 308 (Zertifizierung von KWK-Anlagen - Ermittlung des KWK-Stromes -)
- AVBFernwärmeV - Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme - de 20 de junho de 1980 (BGBl. I p. 742), última alteração pelo Artigo 20 da Lei de 9 de dezembro de 2004 (BGBl. I p. 3214)
- BauGB - Baugesetzbuch na versão da publicação de 23 de setembro de 2004 (BGBl. I p. 2414), última alteração pelo Artigo 4 da Lei de 31 de julho de 2009 (BGBl. I p. 2585)
- BauNVO - Baunutzungsverordnung - na versão publicada em 23 de janeiro de 1990 (BGBl. I p. 132), alterado pelo Artigo 3 da Lei de 22 de abril de 1993 (BGBl. I p. 466)
- BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz na versão publicada em 26 de setembro de 2002 (BGBl. I p. 3830), última alteração pelo Artigo 2 da Lei de 11 de agosto de 2009 (BGBl. I p. 2723)
4. BImSchV - Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen na versão publicada em 14 de março de 1997 (BGBl. I p. 504), última alteração pelo Artigo 13 da Lei de 11 agosto de 2009 (BGBl. I p. 2723)
- BioAbfV - Bioabfallverordnung - versão publicada em 21 de setembro de 1998 (BGBl. I p. 2955), última alteração pelo Artigo 5 do Regulamento de 20 de outubro de 2006 (BGBl. I p. 2298)
- BiomasseV - Biomasseverordnung - de 21 de junho de 2001 (BGBl. I p. 1234), alterado pelo Regulamento de 9 de agosto de 2005 (BGBl. I p. 2419)
- EEG - Erneuerbare-Energien-Gesetz (Lei Alemã de Energias Renováveis) de 25 de outubro de 2008 (BGBl. I p. 2074), última alteração pelo Artigo 12 da Lei de 22 de dezembro de 2009 (BGBl. I p. 3950)
- EEWärmeG - Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - de 7 de agosto de 2008 (BGBl. I p. 1658), alterada pelo Artigo 3 da Lei de 15 de julho de 2009 (BGBl. I p. 1804)
- DüV - Düngeverordnung na versão publicada em 27 de fevereiro de 2007 (BGBl. I p. 221), última alteração pelo Artigo 18 da Lei de 31 de julho de 2009 (BGBl. I p. 2585)
- DüMV - Düngemittelverordnung de 16 de dezembro de 2008 (BGBl. I p. 2524), última alteração pelo Artigo 1 do Regulamento de 14 de dezembro de 2009 (BGBl. I p. 3905)
- GasNEV - Gasnetzentgeltverordnung - de 25 de julho de 2005 (BGBl. I p. 2197), última alteração pelo Artigo 2 (4) do Regulamento de 17 de outubro de 2008 (BGBl. I p. 2006)
- GasNZV - Gasnetzzugangsverordnung - de 25 de julho de 2005 (BGBl. I p. 2210), última alteração pelo Artigo 2 (3) do Regulamento de 17 de outubro de 2008 (BGBl. I p. 2006)
- KrW-/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz de 27 de setembro de 1994 (BGBl. I p. 2705), última alteração pelo Artigo 3 da Lei de 11 de agosto de 2009 (BGBl. I p. 2723)
- KWKG 2002 - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz de 19 de março de 2002 (BGBl. I p. 1092), última alteração pelo Artigo 5 da Lei de 21 de agosto de 2009 (BGBl. I p. 2870)
- TA Lärm - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - de 26 de agosto de 1998 (GMBL. 1998, p. 503)

TA Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – de 24 de julho de 2002 (GMBL 2002, p. 511)

TierNebG – Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz de 25 de janeiro de 2004 (BGBl. I p. 82), última alteração pelo Artigo 2 do Regulamento de 7 de maio de 2009 (BGBl. I p. 1044)

TierNebV – Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung de 27 de julho de 2006 (BGBl. I p. 1735), última alteração pelo Artigo 19 da Lei de 31 de julho de 2009 (BGBl. I p. 2585)

UVPG – Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung de 25 de junho de 2005 (BGBl. I pp. 1757, 2797), última alteração pelo Artigo 1 da Lei de 11 de agosto de 2009 (BGBl. I p. 2723)

RE 1774/2002/CE – Regulamento 1774/2002/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 3 de outubro de 2002, que estabelece regras sanitárias relativas aos subprodutos animais não destinados ao consumo humano, (JO L 273 p. 1), última alteração pelo Regulamento 1432/2007/CE de 5 de dezembro de 2007 (JO L 320 p. 13)

RE 181/2006/CE – Regulamento 181/2006/CE da Comissão Europeia de 1º de fevereiro de 2006 que aplica o Regulamento (CE) nº 1774/2002 no que se refere aos fertilizantes orgânicos e correctivos orgânicos do solo, com exceção do esterco e que altera esse regulamento (JO L 29 p. 31)



Fonte: Paterson (FNIR)



O aspecto decisivo na decisão de construir uma usina de biogás é a questão de se o capital e o trabalho utilizados são remunerados adequadamente. Em outras palavras, a operação da usina planejada é viável economicamente?

A fim de facilitar a avaliação da rentabilidade das usinas de biogás, a questão é apresentada a seguir com base em usinas-modelo.

8.1 Representação das usinas-modelo – Hipóteses e dados característicos

O dimensionamento de usinas e a escolha de substratos consideraram as condições e restrições de remuneração do uso de substratos conforme a EEG de 2009. Adotou-se 2011 como o ano de início de operação.

8.1.1 Potência das usinas

A potência das usinas vem aumentando continuamente nos últimos anos. Com a inclusão do "bônus de esterco líquido" na EEG de 2009 [8-1], o número de pequenas usinas com potência em torno de 150 kW_{el} vem crescendo novamente. Para cobrir o espectro das usinas construídas na prática, foram criados nove modelos com potência elétrica de 75 kW a 1 MW, bem como uma usina com tratamento de biogás (cf. tabela 8.1). A escolha das dimensões das usinas considerou não só a situação legal da remuneração com limiares de potência da EEG de 150 e 500 kW_{el}, mas também os limiares legais de licenciamento da BImSchG, a Lei Alemã de Proteção contra Emissões. Como a BImSchG estipula uma potência máxima de combustão permitida, é construído um grande número de usinas com potência elétrica de 350 kW. Além disso, uma das usinas é usada para demonstrar os custos da geração de gás e sua injeção na rede de gás natural.

8.1.2 Substratos

Matérias-primas de uso comum na agricultura e apropriadas para a utilização em usinas de biogás são selecionadas como substrato. Entre esses substratos destacam-se os adubos orgânicos e as silagens, originalmente usados na agricultura, bem como subprodutos do beneficiamento de matérias-primas vegetais. Também foi considerado o grupo de resíduos orgânicos. O bônus relativo a biomassas dedicadas tem o seu valor reduzido proporcionalmente se forem utilizados subprodutos, sendo suspenso completamente se a usina toda utilizar resíduos.

A tabela 8.1 mostra os parâmetros dos substratos utilizados. Os dados de rendimento de gás correspondem aos valores padrão do grupo de trabalho "Rendimentos de gás", da Curadoria Alemã para a Tecnologia e Construção na Agricultura (KTBL), publicados no fascículo "Rendimento de biogás em usinas de biogás agrícolas" (cf. tabela 8.2) [8-4].

Supõe-se que a usina de biogás se situe no local em que se realiza a criação do gado, não havendo, portanto, custos do uso de adubos orgânicos. Se o esterco for fornecido por terceiros, devem ser incluídos os custos de transporte. Para as biomassas dedicadas, foi assumido um custo médio de fornecimento conforme o banco de dados da KTBL.

Os valores dos subprodutos vegetais e resíduos correspondem aos preços de mercado mencionados na tabela. Os preços incluem o transporte até o local da usina de biogás. Os substratos sazonais são armazenados nas dependências da usina. Os preços das silagens se referem ao material fresco entregue. As perdas de até 12% na silagem são arcadas pela usina de biogás. O armazenamento intermediário é mantido com uma capacidade de aprox. uma semana para substratos fornecidos continuamente. Assume-se que os substratos a serem higienizados por lei (BioAbfV, Diretiva da UE 1774) já chegam à

Tabela 8.1: Visão geral e caracterização das usinas-modelo

Modelo	Potência	Caracterização
I	75 kW _{el}	
II	150 kW _{el}	Uso de biomassas dedicadas e ≥ 30% de esterco (suficiente para a qualificação ao bônus de esterco líquido); nos exemplos, mín. 34% de esterco na matéria fresca diariamente utilizada
III	350 kW _{el}	
IV	350 kW _{el}	Digestão de 100% de biomassas dedicadas; separação e recirculação de material
V	500 kW _{el}	Digestão de esterco e subprodutos vegetais conforme Anexo 2 da EEG
VI	500 kW _{el}	Digestão de 100% de biomassas dedicadas; separação e recirculação de material
VII	500 kW _{el}	Digestão de esterco e resíduos orgânicos. Usinas que processam resíduos orgânicos não recebem o bônus NawaRo nem o bônus de esterco líquido. Portanto, a proporção de esterco na matéria fresca não pode ser inferior a 30%.
VIII	1.000 kW _{el}	Digestão de 100% de biomassas dedicadas; separação e recirculação de material
IX	500 kW _{el}	Fermentação a seco com a técnica de garagem; uso de esterco sólido e biomassas dedicadas
X	500 m ³ /h ^a	Arquitetura e uso de substratos como a usina VIII; tratamento do biogás e injeção em lugar de usina de cogeração

a. Fluxo de gás bruto por hora (500 m³/h correspondem a uma potência aproximada de 1 MW_{el})

Tabela 8.2: Parâmetros e custos dos substratos

Substratos	MS	MOS	Produção de biogás	Teor de metano	Produção de metano	Custo adicional
	%	% de MS	Nm ³ /t MOS	%	Nm ³ /t	€/t MF
Esterco líquido bovino com restos de ração	8	80	370	55	13	0
Esterco líquido suíno	6	80	400	60	12	0
Esterco bovino	25	80	450	55	50	0
Silagem de milho, pastoso, rico em grãos	35	96	650	52	114	31
Grãos de cereais, moído	87	98	700	53	316	120
Silagem de gramíneas	25	88	560	54	67	34
SPI de cereal, conteúdo médio de grãos	40	94	520	52	102	30
Glicerol	100	99	850	50	421	80
Torta de canola, 15% Teor residual de óleo	91	93	680	63	363	175
Cereal (resíduos)	89	94	656	54	295	30
Restos de alimentos, teor médio de lipídios ^a	16	87	680	60	57	5
Gordura do raspador de gordura ^a	5	90	1000	68	31	0
Resíduos orgânicos ^a	40	50	615	60	74	0

a. Substratos fornecidos higienizados

usina higienizados e o custo desse tratamento já está incluído no preço.

A tabela 8.3 apresenta um resumo dos tipos e quantidades de substratos utilizados nas usinas-modelo. Os substratos foram selecionados de modo que

as usinas I-III e V recebam o bônus de esterco líquido pelo uso de mais de 30% de adubos orgânicos.

Como utiliza subprodutos vegetais (conforme o Anexo 2, EEG de 2009, cf. capítulo 7.3.3.2), a usina V recebe um bônus reduzido pela biomassa dedicada

Tabela 8.3: Substratos utilizados em usinas-modelo [t MF/a]

Usinas-modelo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Substrato	30 % esterco, 70% culturas energéticas			100 % Culturas energéticas	Subprodutos	100 % Culturas energéticas	Resíduos orgânicos	100 % Culturas energéticas	FS ^a	Tratamento de gás
	75 kW _{el}	150 kW _{el}	350 kW _{el}	350 kW _{el}	500 kW _{el}	500 kW _{el}	500 kW _{el}	1.000 kW _{el}	500 kW _{el}	500 m ³ /h ^b
Esterco líquido bovino	750	1.500	3.000		3.500		4.000			
Esterco líquido suíno					3.500					
Esterco bovino									2.000	
Milho, silagem, pastoso, rico em grãos	1.250	2.500	5.750	5.500		7.400		14.000	5.000	14.000
Grãos de cereais, moído			200			200		500		500
Silagem de gramíneas	200	200							2.600	
SPI de cereal, conteúdo médio de grãos				1.300		1.500		2.500	2.100	2.500
Glicerol					1.000					
Torta de canola, 15% teor residual de óleo					1.000					
Cereais (resíduos)					620					
Restos de alimentos, teor médio de lipídios							8.000			
Gordura do raspador de gordura							4.600			
Resíduos orgânicos							5.500			

a. FS: Fermentação a seco

b. Vazão de gás bruto por hora

(culturas energéticas). A usina VII utiliza resíduos orgânicos e portanto não recebe o bônus NawaRo.

A totalidade dos substratos utilizados pelas usinas IV, VI, VIII e X são biomassas dedicadas na acepção da EEG. Uma parte do biofertilizante é separada a fim de que o substrato utilizado possa ser bombeado e a fase líquida recirculada.

As usinas VIII e X distinguem-se apenas quanto à utilização do gás. Enquanto a usina VIII produz eletricidade e calor, a X realiza o tratamento do gás produzido para que possa ser injetado na rede de gás natural. A usina IX é um biodigestor de fermentação a seco (FS) do tipo garagem. Nela são utilizados esterco bovino sólido e silagem.

8.1.3 Projeto técnico e biológico

Os substratos foram selecionados de modo que as respectivas quantidades de biogás e energia produzidas permitam a cada usina operar por 8.000 horas por ano em carga total. Com base nos tipos e quantidades de substrato, foram determinados os parâmetros de dimensionamento para as operações de armazenamento e carregamento, e do biodigestor e depósito de biofertilizantes.

Foram adotados os parâmetros da tabela 8.4 para garantir a estabilidade biológica e técnica da operação, e ao mesmo tempo assegurar a rentabilidade.

Tabela 8.4: Dados técnicos característicos assumidos para processos e dimensionamento das usinas

Pressupostos de dimensionamento técnico	
Carga orgânica volumétrica	No máximo 2,5 kg MOS/m ³ de volume útil do biodigestor (total) por dia
Tipo de sistema	Processo de estágio único: < 350 kW _{el} Processo de dois estágios: ≥ 350 kW _{el}
Carga orgânica volumétrica 1. biodigestor em sistemas de dois ou mais estágios	No máximo 5,0 kg MOS/m ³ do volume útil do biodigestor por dia
Teor de MS na mistura	No máximo 30% MS, do contrário separação e recirculação (com exceção da fermentação a seco)
Equipamentos de transporte	Trator com carregador frontal ou carregadeira, conforme a quantidade de substrato a ser movimentado (fonte: banco de dados da KTBL)
Volume do biodigestor	Volume do biodigestor necessário para uma carga orgânica volumétrica de 2,5 kg MOS por dia, mais 10% de margem de segurança, tempo mínimo de retenção de 30 dias
Potência instalada e equipamento dos agitadores	Biodigestor 1º nível: 20-30 W/m ³ do volume do digestor; Biodigestor 2º nível: 10-20 W/m ³ do volume do digestor; em dependência das características do substrato; número e tipos de agitadores conforme o tamanho do biodigestor
Armazenamento de biofertilizantes	Capacidade de armazenamento de 6 meses para toda a quantidade de biofertilizantes (incl. parte de esterco), mais 10% de margem de segurança; cobertura impermeável a gases
Comercialização do calor	Venda do calor: 30 % da energia térmica gerada; preço do calor 2 ct €/kWh; interface de trocador de calor de usina de cogeração
Tipo da usina de cogeração	75 kW e 150 kW: Motor do ciclo Diesel; ≥ 350 kW: Motor a gás do ciclo Otto
Eficiência da usina de cogeração	De 34% (75 kW) a 40% (1.000 kW) (fonte: Dados Característicos de Usinas de Cogeração 2005 da ASUE)
Usina de cogeração - horas em carga total	8.000 horas por ano em carga total Esse valor-alvo pressupõe condições ideais de operação da usina

As usinas-modelo I e II operam em estágio único. As demais usinas de digestão úmida operam em sistema de dois estágios, sendo que as usinas-modelo VIII e X têm 2 digestores operando paralelamente em cada um dos estágios.

A tabela 8.5 mostra as tecnologias e os equipamentos agrupados em componentes que compõem as usinas-modelo.

São pressupostas também as seguintes situações para os cálculos das usinas-modelo:

Introdução de sólidos: com exceção da usina-modelo VII, todas as outras requerem um sistema de introdução de sólidos em função do tipo e da quantidade de substrato utilizado. No modelo VII, os substratos higienizados são fornecidos em estado bombeável e homogeneizados em um tanque intermediário.

Armazenamento dos biofertilizantes: todas as usinas-modelo consideram uma capacidade de armazenamento coberto e impermeável a gases suficiente para seis meses de biofertilizantes acumulados. A razão disso é corresponder à exigência da EEG de que

os depósitos de biofertilizantes tenham uma cobertura impermeável para que a usina tenha direito ao bônus NawaRo, no caso de usinas de biogás sujeitas à Lei Alemã de Proteção contra Emissões (BImSchG). Com frequência não é tecnicamente possível reformar tanques de esterco existentes.

Higienização: na usina-modelo VII são processados substratos cuja higienização é obrigatória. Pressupõe-se que eles são fornecidos higienizados e, portanto, não necessitam de recursos técnicos para a higienização. Os custos de higienização já estão embutidos no preço do substrato.

Injeção de biogás: para o equipamento de injeção de gás, considerou-se a cadeia completa de processos, até a injeção na tubulação de gás natural. No entanto, são apresentados também os custos de fornecimento de gás bruto e gás tratado, pois na prática se observam diversos modelos de cooperação com distribuidoras e empresas de fornecimento de gás. Conforme o § 33 (1) da alteração do Regulamento de Acesso à Rede de Gás, a distribuidora de gás deve arcar com 75% dos

Tabela 8.5: Tecnologias das usinas-modelo

Componente	Descrição e partes principais
Depósito de substrato	Base de silagem em concreto, conforme o caso com muros de concreto, tanque de aço como depósito intermediário para substratos líquidos
Reservatório de alimentação	Reservatório de concreto Equipamentos de agitação, fragmentação e bombeamento, conforme o caso abertura de enchimento, tubulações de substrato, medição de nível, detecção de vazamento
Introdução de sólidos (somente culturas energéticas)	Introdução por rosca, pistão ou misturador Tremonha de enchimento, dispositivo de pesagem, alimentação do digestor
Biodigestor	Reservatório de concreto acima do solo em pé Aquecimento, isolamento, cobertura, equipamento de agitação, cobertura do reservatório impermeável a gases (armazenamento de gás), tubulações de substrato e gás, biodessulfurização, equipamentos de medição/controle/segurança, detecção de vazamentos
a $\geq 500 \text{ kW}_{el}$ biodessulfurização externa	Dessulfurização incluindo equipamento e tubulação
Usina de cogeração	Motor a gás do ciclo Otto ou Diesel Bloco do motor, gerador, trocador de calor, distribuidor de calor, radiador de emergência, controlador, tubulação de gás, equipamentos de medição/controle/segurança, medidor de calor e eletricidade, sensores, purgador de vapor, estação de ar comprimido, se necessário equipamento adicional de gás, reservatório de óleo, container
Injeção de biogás	Lavagem com água sob pressão, dosagem de GLP, análise de gases, odorização, tubulações de conexão, caldeira de biogás
Tocha de gás	Tocha de gás com equipamentos para gases
Depósito de biofertilizantes	Reservatório de concreto Equipamentos de agitação, tubulações de substrato, equipamento de transporte, detecção de vazamentos, reservatório impermeável a gases, equipamentos de medição/controle/segurança, biodessulfurização, tubulações de gás, e se necessário separador

custos da conexão, e os demais 25% são de responsabilidade do fornecedor do gás (cf. também 7.4.3.2). Para conexões com comprimento de até um quilômetro, é previsto um teto de 250.000 € na participação dos custos pelo fornecedor. Os custos fixos são de responsabilidade da empresa distribuidora. O modelo X assume que o fornecedor arca com 250.000 € dos custos de conexão.

8.1.4 Valores característicos técnicos e de processos

As tabelas 8.6, 8.7 e 8.8 dão uma visão geral dos valores característicos técnicos e de processos das usinas-modelo.

8.1.5 Investimentos para as unidades funcionais das usinas-modelo

As tabelas 8.9 e 8.10 contêm uma visão geral dos investimentos necessários para cada usina-modelo. Os itens listados abrangem os seguintes componentes (cf. tabela 8.5):

- Depósito de substrato e carregamento
 - Depósito de substrato
 - Reservatório de alimentação
 - Introdução de sólidos
- Biodigestor
- Utilização do gás e controle
 - Dessulfurização externa
 - Usina de cogeração (incl. periféricos)
 - Conforme o caso, injeção de gás com tratamento e conexão à rede (estação de injeção e canalização de conexão à rede de gás natural)
 - Tocha de gás
- Armazenamento de biofertilizantes (se necessário com separação).

Tabela 8.6: Valores característicos técnicos e de processos das usinas-modelo I a V

Dados técnicos e de processos	Unidade	I	II	III	IV	V
		30% esterco líquido, 70% culturas energéticas			100% culturas energéticas	Subprodutos
		75 kW _{el}	150 kW _{el}	350 kW _{el}	350 kW _{el}	500 kW _{el}
Pot. elétrica	kW	75	150	350	350	500
Tipo do motor		Ignição a compressão	Ignição a compressão	Ciclo Otto	Ciclo Otto	Ciclo Otto
Eficiência elétrica	%	34	36	37	37	38
Eficiência térmica	%	44	42	44	44	43
Volume bruto do biodigestor	m ³	620	1.200	2800	3.000	3.400
Volume do depósito de biofertilizantes	m ³	1.100	2.000	4.100	2.800	4.100
Conteúdo de MS da mistura de substratos (incl. material recirculado)	%	24,9	24,9	27,1	30,9	30,7
Tempo médio de retenção hidráulica	d	93	94	103	119	116
Carga orgânica volumétrica	kg MOS/m ³ · d	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5
Produção de biogás	m ³ /a	315.400	606.160	1.446.204	1.455.376	1.906.639
Teor de metano	%	52,3	52,3	52,2	52,0	55,2
Eletricidade injetada	kWh/a	601.114	1.203.542	2.794.798	2.800.143	3.999.803
Calor gerado	kWh/a	777.045	1.405.332	3.364.804	3.364.388	4.573.059

Tabela 8.7: Dados característicos técnicos e de processos das usinas-modelo VI a IX

Dados técnicos e de processos	Unidade	VI	VII	VIII	IX
		100% culturas energéticas 500 kW _{el}	Resíduos orgânicos 500 kW _{el}	100% culturas energéticas 1.000 kW _{el}	Fermentação a seco 500 kW _{el}
Pot. elétrica	kW	500	500	1000	500
Tipo do motor		Ciclo Otto	Ciclo Otto	Ciclo Otto	Ciclo Otto
Eficiência elétrica	%	38	38	40	38
Eficiência térmica	%	43	43	42	43
Volume bruto do biodigestor	m ³	4.000	3.400	7.400	3.900
Volume do depósito de biofertilizantes	m ³	3.800	11.400	6.800	0
Conteúdo de MS da mistura de substratos (incl. material recirculado)	%	30,7	18,2	30,6	32,0
Tempo médio de retenção hidráulica	d	113	51	110	24 (~69) ^a
Carga orgânica volumétrica	kg MOS/m ³ · d	2,5	2,4	2,5	2,5
Produção de biogás	m ³ /a	2.028.804	1.735.468	3.844.810	2.002.912
Teor de metano	%	52,1	60,7	52,1	52,6
Eletricidade injetada	kWh/a	4.013.453	4.001.798	8.009.141	4.002.618
Calor gerado	kWh/a	4.572.051	4.572.912	8.307.117	4.572.851

a. entre parênteses: tempo total de retenção por recirculação dos biofertilizantes como inóculo

Tabela 8.8: Dados característicos técnicos e de processos da usina-modelo X

Dados técnicos e de processos	Unidade	X Tratamento de gás
Potência nominal:	m ³ /h	500
Fluxo volumétrico médio	m ³ /h	439
Grau de utilização	h/a	7.690
Consumo próprio de biogás para o aquecimento do biodigestor	%	5
Perda de metano	%	2
Poder calorífico inferior gás bruto	kWh/m ³	5,2
Poder calorífico inferior gás tratado	kWh/m ³	9,8
Poder calorífico inferior gás injetado	kWh/m ³	11,0
Volume bruto do biodigestor	m ³ /h	7.400
Volume do depósito de biofertilizantes	m ³ /h	6.800
Conteúdo de MS da mistura de substratos (incl. material recirculado)	%	30,6
Tempo médio de retenção hidráulica	d	110
Carga orgânica volumétrica	kg MOS/m ³ · d	2,5
Gás bruto	m ³ /a kWh/a	3.652.570 19.021.710
Gás tratado	m ³ /a kWh/a	1.900.128 18.621.253
Gás injetado	m ³ /a kWh/a	2.053.155 22.581.100

Tabela 8.9: Investimentos para unidades funcionais das usinas-modelo I a V

Investimentos	Unidade	I 30% esterco líquido, 70% culturas energéticas		III	IV 100% culturas energéticas	V Subprodutos
		75 kW _{el}	150 kW _{el}	350 kW _{el}	350 kW _{el}	500 kW _{el}
Depósito de substrato e carregamento	€	111.703	183.308	291.049	295.653	196.350
Biodigestor	€	72.111	108.185	237.308	259.110	271.560
Utilização do gás e controle	€	219.978	273.777	503.466	503.996	599.616
Armazenamento de biofertilizantes	€	80.506	117.475	195.409	178.509	195.496
Total de componentes	€	484.297	682.744	1.227.231	1.237.269	1.263.022
Planejamento e licenciamento	€	48.430	68.274	122.723	123.727	126.302
Total de investimentos	€	532.727	751.018	1.349.954	1.360.996	1.389.324
Investimentos especiais	€/kW _{el}	7.090	4.992	3.864	3.888	2.779

Tabela 8.10: Investimentos para unidades funcionais das usinas-modelo VI a X

Investimentos	Unidade	VI	VII	VIII	IX ^a	X ^b
		100% culturas energéticas 500 kW _{el}	Resíduos orgânicos 500 kW _{el}	100% culturas energéticas 1.000 kW _{el}	Fermentação a seco 500 kW _{el}	Tratamento de gás
Depósito de substrato e carregamento	€	365.979	173.553	644.810	452.065	644.810
Biodigestor	€	309.746	275.191	593.714	810.000	593.714
Utilização do gás e controle	€	601.649	598.208	858.090	722.142	1.815.317
Armazenamento de biofertilizantes	€	211.098	555.528	371.503	0	371.503
Total de componentes	€	1.488.472	1.602.480	2.468.116	1.984.207	3.425.343
Planejamento e licença	€	148.847	160.248	246.812	198.421	342.534
Total de investimentos	€	1.637.319	1.762.728	2.714.928	2.182.628	3.767.878
Investimentos especiais	€/kW _{el}	3.264	3.524	2.712	4.362	---

a. utilizando [8-2], [8-3]

b. utilizando [8-6]

8.2 Economia das usinas-modelo

8.2.1 Receitas

As usinas de biogás proporcionam diversas fontes de receitas:

- Venda de energia elétrica
- Venda de calor
- Venda de gás
- Renda da eliminação de substratos de fermentação
- Venda de biofertilizantes

Com exceção dos casos de injeção de gás na rede de distribuição, a maior fonte de renda das usinas de biogás é a venda de energia elétrica. Como o valor da remuneração e a vigência do direito a recebê-la (ano de entrada em operação mais 20 anos) são regulamentados por lei, as receitas da venda de eletricidade podem ser planejadas sem risco (cf. capítulo 7.3.2). Dependendo do tipo e da quantidade do substrato utilizado, potência da usina e outros critérios que condicionam a qualificação aos bônus, o preço pago pode variar muito, entre aprox. 8 e 30 ct €/kWh. Os bônus são concedidos pelo uso exclusivo de culturas energéticas e esterco líquido, pela utilização racional do calor residual, pela adoção de tecnologias inovadoras e pelo cumprimento dos valores-limite de formaldeído previstos na TA Luft (cf. capítulo 7.3.3.3). As regras de remuneração são tratadas detalhadamente no capítulo 7.3.1. Os valores de remuneração da EEG aqui assumidos em relação às usinas-modelo referem-se à sua en-

trada em operação no ano de 2011. A tabela 8.11 mostra as usinas-modelo e os bônus a que têm direito.

A venda de calor não se dá tão facilmente como a venda de eletricidade. Por isso, já na escolha do local deve-se considerar quais serão os consumidores. Na prática, não é possível aproveitar a totalidade do calor produzido, uma vez que certa parte do calor é utilizada pelos processos. Além disso, a maioria dos consumidores tem uma demanda de calor muito variável ao longo do ano. Na maior parte dos casos, em função do consumo próprio, a quantidade de calor que uma usina de biogás é capaz de disponibilizar está em oposição à demanda de calor dos consumidores potenciais.

Para as usinas-modelo, parte-se do pressuposto que 30% da energia térmica gerada podem ser utilizados adequadamente, conforme o Anexo 3 da EEG, e vendidos por 2 ct €/kWh_{th}.

Assim, além do valor pago pelo calor, as usinas recebem também o bônus de cogeração de 2,94 centavos de euro/kWh_{el} sobre 30% da eletricidade produzida.

Um dos objetivos possíveis é tratar o biogás gerado e injetá-lo na rede de gás natural em vez de convertê-lo em energia elétrica em um processo de cogeração. Usinas desse tipo obtêm a maior parte de suas receitas da venda do gás. Como o seu preço não é regulamentado por lei, deve ser negociado livremente entre o produtor e o consumidor. De acordo com as suas disposições, a EEG, no entanto, prevê a possibilidade de captar o biogás injetado em outro ponto da rede de gás natural e convertê-lo em eletricidade.

Tabela 8.11: Direito à remuneração das usinas-modelo inauguradas em 2011

Usinas-modelo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	30% esterco líquido, 70% culturas energéticas			100 % Culturas energéticas	Subprodutos	100 % Culturas energéticas	Resíduos orgânicos	100 % Culturas energéticas	FS
	75 kW _{el}	150 kW _{el}	350 kW _{el}	350 kW _{el}	500 kW _{el}	500 kW _{el}	500 kW _{el}	1.000 kW _{el}	500 kW _{el}
Remuneração básica	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bônus de biomassa dedicada	x	x	x	x	x ^a	x		x	x
Bônus de esterco líquido	x	x	x		x ^a				
Bônus de cogeração ^b	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bônus de controle da poluição atmosférica					x	x	x	x	x
Ø Centavos de euro/kWh _{el}	23,09	23,09	20,25	17,88	14,08	18,52	11,66	15,93	18,52

a. refere-se apenas à quantidade de eletricidade gerada a partir de culturas energéticas e esterco líquido (cf. capítulo 7.3.1)

b. 30% da energia térmica produzida

Em casos excepcionais, é possível receber uma taxa de eliminação pelos substratos utilizados. A sua viabilidade, todavia, deve ser estudada cuidadosamente e amparada contratualmente antes de ser incluída na contabilidade do planejamento.

O valor dos biofertilizantes é dependente de vários fatores. Conforme a disponibilidade de nutrientes na região, pode-se adotar valores negativos ou positivos, uma vez que, conforme o trajeto, longas distâncias implicam elevados custos de transporte. Além disso, o valor nutritivo do adubo orgânico utilizado deve ser creditado à criação de animais. Para o cálculo das usinas-modelo, assumiu-se que os biofertilizantes são disponibilizados para a produção de plantas por 0 €/t. A produção arca apenas com os custos de deposição, e assim pode disponibilizar os substratos a preço inferior.

8.2.2 Custos

Essencialmente, esses itens se estruturam da seguinte forma:

- Custos variáveis (de substratos, insumos indiretos, manutenção, reparos e análise laboratorial) e
- Custos fixos (custos dependentes de investimentos – p. ex. depreciação, juros, seguros – e custos trabalhistas).

Esses itens são explicados detalhadamente a seguir.

8.2.2.1 Custos variáveis

Custos do substrato

Os custos do substrato podem chegar a 50% dos custos totais. Esse é o caso especialmente de usinas que produzem biogás com base em culturas energéticas. Os custos estimados para os diversos substratos se encontram na tabela 8.2. A soma dos custos de substratos se encontra nas tabelas 8.12, 8.13 e 8.14. Em função de perdas no armazenamento e conservação, variáveis conforme o substrato, a massa a ser armazenada é superior à massa efetivamente utilizada na usina.

Insumos indiretos

Entre os insumos indiretos destacam-se a energia elétrica consumida, o óleo de ignição, óleo lubrificante, óleo diesel, bem como lonas de PVC e sacos de areia para a cobertura da silagem. No caso de injeção de gás, inclui-se o propano adicionado para o condicionamento do gás.

Manutenção e reparo

Conforme o componente, os custos de manutenção e reparo giram em torno de 1% a 2% do custo de investimento. Alguns componentes dispõem de dados mais exatos, o que permite calcular o custo em função da potência (p. ex. usina de cogeração com motor a gás do ciclo Otto: 1,5 centavo de euro/kWh_{el}).

Análises laboratoriais

O controle de processos em nível comercial exige análises laboratoriais do conteúdo do biodigestor. Os cál-

Tabela 8.12: Análise do custo/benefício das usinas-modelo I a V

Análise custo/benefício	Unidade	I	II	III	IV	V
		30% esterco líquido, 70% culturas energéticas			100% culturas energéticas	Subprodutos
		75 kW _{el}	150 kW _{el}	350 kW _{el}	350 kW _{el}	500 kW _{el}
<i>Receitas</i>						
Eletricidade injetada	kWh/a	601.114	1.203.542	2.794.798	2.800.143	3.999.803
Tarifa média ct €/kWh	ct €/kWh	23,09	23,09	20,25	17,88	14,08
Venda de energia elétrica	€/a	138.809	277.922	565.856	500.730	563.258
Venda de calor	€/a	4.662	8.457	20.151	20.187	27.437
Total de receitas	€/a	143.472	286.379	586.007	520.918	590.695
<i>Custos variáveis</i>						
Custos do substrato	€/a	51.761	95.795	226.557	238.068	273.600
Insumos indiretos	€/a	17.574	29.387	36.043	42.900	45.942
Manutenção e reparo	€/a	12.900	17.664	57.369	58.174	73.662
Análises laboratoriais	€/a	720	720	1.440	1.440	1.440
Total de custos variáveis	€/a	82.956	143.566	321.408	340.582	394.643
<i>Margem de contribuição</i>	<i>€/a</i>	<i>60.516</i>	<i>142.813</i>	<i>264.599</i>	<i>180.335</i>	<i>196.052</i>
<i>Custos fixos</i>						
Depreciação	€/a	56.328	78.443	110.378	113.768	117.195
Juros	€/a	10.655	15.020	26.999	27.220	27.786
Seguros	€/a	2.664	3.755	6.750	6.805	6.947
Mão de obra	homem-hora/dia	1,97	3,25	6,11	6,20	6,05
Mão de obra	homem-hora/ano	719	1.188	2.230	2.264	2.208
Mão de obra	€/a	10.778	17.813	33.455	33.957	33.125
Total dos custos fixos	€/a	80.424	115.031	177.582	181.750	185.052
<i>Receita s/custos diretos</i>	<i>€/a</i>	<i>-19.908</i>	<i>27.782</i>	<i>87.016</i>	<i>-1.415</i>	<i>10.999</i>
Custos gerais	€/a	750	1.500	3.500	3.500	5.000
Custos totais	€/a	164.130	260.097	502.491	525.833	584.696
Custos de geração de energia elétrica	ct €/kWh _{el}	26,53	20,91	17,26	18,06	13,93
Lucro/prejuízo	€/a	-20.658	26.282	83.516	-4.915	5.999
Retorno sobre o ativo	%	-3,8	11,0	16,4	3,3	4,9

culos das usinas consideraram 6 análises por biodigestor por ano, cada uma com o custo de 120 €.

8.2.2.2 Custos fixos

Custos dependentes de investimento

Esses custos são compostos por depreciação, juros e seguros. A depreciação é específica do componente. Rea-

liza-se uma depreciação linear ao longo de 20 anos para construções e de 4 a 10 anos para os equipamentos instalados. O capital imobilizado é remunerado a uma taxa de juros de 4%. Para efeito dos cálculos econômicos aqui realizados, não se distingue o capital próprio do capital de terceiros. Estipulou-se uma taxa geral de 0,5% do total do capital investido, referente aos custos de seguros.

Custos trabalhistas

Como as atividades na usina de biogás geralmente são realizadas por empregados fixos e – se a disponibilização de substrato for considerada como atividade agrícola – não existem picos de atividade, o trabalho é considerado como custo fixo. O tempo de trabalho necessário é calculado principalmente pelo tempo de acompanhamento (supervisão, controle e manutenção) e pela introdução de substrato. O tempo de acompanhamento assumido se dá em função da potência instalada, conforme a figura 9.5 no capítulo "Organização Operacional" (capítulo 9.1.3.2).

Já o tempo necessário para carregar o substrato foi calculado com base nos dados da KTBL, em função do tipo de substrato e do equipamento utilizado. Para a remuneração da mão de obra, adotou-se uma tarifa de 15 €/h.

Custos da terra

A operação das usinas-modelo não considerou os custos de uso da terra. Sendo a usina operada comercialmente ou em regime de consórcio, deve-se considerar custos adicionais como arrendamento/taxa de arrendamento.

8.2.3 Análise custo/benefício

O objetivo mínimo de uma usina de biogás é remunerar o capital aplicado e o trabalho realizado. Qualquer lucro além desse objetivo justifica o risco empresarial envolvido. A seguir explica-se o lucro esperado da operação das usinas-modelo.

O modelo I não tem condições de atingir um resultado positivo, apesar da elevada remuneração. A principal razão disso são os elevados investimentos específicos dessa usina de pequeno porte ($> 7.000 \text{ €/kW}_{el}$).

Os investimentos específicos dos modelos II e III são significativamente menores. O motivo principal dos lucros proporcionados, no entanto, é o bônus de esterco líquido concedido a essas usinas, que monta a respectivamente 47.000 € e 66.000 €.

A importância desse bônus é evidenciada pela comparação das usinas III e IV, de capacidade equivalente. Embora a usina que processa substrato de culturas energéticas (IV) tenha custos totais apenas ligeiramente superiores, não tem direito ao bônus de esterco líquido, o que reduz a remuneração da energia elétrica e impossibilita a obtenção de lucro.

A usina V obtém apenas um lucro muito reduzido. Isso se explica pelo fato de a energia elétrica ser ge-

rada principalmente de subprodutos vegetais e, portanto, os bônus NawaRo e de esterco líquido a que ela tem direito são pagos sobre uma fração inferior a 10% da eletricidade produzida.

A usina de culturas energéticas, com capacidade de 500 kW, e a usina de resíduos, com 500 kW, proporcionam um lucro equivalente de aprox. 80.000 € e 90.000 €. No entanto, tais lucros se compõem de diferentes formas. Ainda que os custos fixos de ambas estejam no mesmo patamar, a usina baseada em culturas energéticas tem de arcar com custos de substrato bem maiores. Por outro lado, ela tem direito ao bônus NawaRo, cuja taxa de remuneração é superior ($6,86 \text{ ct €/kWh}_{el}$), resultando em aumentos de receita da ordem de 275.000 €/a. Embora a usina de resíduos seja remunerada com taxas inferiores, tem também custos inferiores com o substrato. Seria possível elevar a rentabilidade se houvesse uma forma de obter rendas relativas à eliminação pelos resíduos utilizados.

Apesar de processarem o mesmo tipo de substrato, a usina VIII obtém lucro inferior à usina VI. A EEG determina que usinas com capacidade superior a 500 kW recebam remuneração inferior. Com isso, o preço da eletricidade da usina VIII é aprox. 14% inferior ao da usina VI. Essa diferença não é compensada mesmo pela maior economia proporcionada pela grande escala da usina.

A usina de 500 kW de fermentação a seco proporciona um lucro de aprox. 30.000 €. Especialmente a maior demanda de mão de obra, em função do gerenciamento do substrato, e o maior peso dos custos fixos fazem com que o lucro seja inferior ao da usina de digestão úmida VI, que, tendo a mesma capacidade, também utiliza 100% de culturas energéticas.

Como atualmente não estão disponíveis os preços de mercado do biometano injetado, em lugar da análise custo/benefício da estação de injeção apenas os custos são listados. Os custos relacionados em cada item se referem ao processo completo, até a injeção na rede de gás natural. São apresentados também os valores desdobrados dos custos totais e específicos associados ao fornecimento do gás bruto (interface na usina de biogás) e gás tratado (interface na estação de tratamento de biogás). Os preços não são diretamente comparáveis, uma vez que nas interfaces são fornecidas quantidades diferentes de gás e energia. Assim, é adicionado, por exemplo, o propano, cujo custo é inferior ao do biogás produzido, relativamente ao seu poder energético. Com isso, os custos específicos do gás injetado são inferiores aos custos do gás tratado (proporcionalmente ao poder energético).

Tabela 8.13: Análise custo/benefício para as usinas-modelo VI a IX

Análise custo/benefício	Unidade	VI	VII	VIII	IX
		100% culturas energéticas 500 kW _{el}	Resíduos orgânicos 500 kW _{el}	100% culturas energéticas 1000 kW _{el}	Fermentação a seco 500 kW _{el}
<i>Receitas</i>					
Eletricidade injetada	kWh/a	4.013.453	4.001.798	8.009.141	4.002.618
Tarifa média ct €/kWh	ct €/kWh	18,52	11,66	15,93	18,52
Venda de energia elétrica	€/a	743.194	466.606	1.276.023	741.274
Venda de calor	€/a	27.525	27.450	49.900	27.455
Total de receitas	€/a	770.719	494.055	1.325.922	768.729
<i>Custos variáveis</i>					
Custos do substrato	€/a	335.818	40.000	638.409	348.182
Insumos indiretos	€/a	51.807	57.504	106.549	50.050
Manutenção e reparo	€/a	78.979	76.498	152.787	81.876
Análises laboratoriais	€/a	1.440	1.440	2.880	1.440
Total de custos variáveis	€/a	468.045	175.442	900.625	481.548
<i>Margem de contribuição</i>	€/a	302.674	318.613	425.297	287.182
<i>Custos fixos</i>					
Depreciação	€/a	135.346	143.657	226.328	147.307
Juros	€/a	32.746	35.255	54.299	41.284
Seguros	€/a	8.187	8.814	13.575	10.321
Mão de obra	homem-hora/dia	7,24	6,31	11,19	9,41
Mão de obra	homem-hora/ano	2.641	2.304	4.086	3.436
Mão de obra	€/a	39.613	34.566	61.283	51.544
Total dos custos fixos	€/a	215.893	222.291	355.485	250.456
<i>Receita s/custos diretos</i>	€/a	86.781	96.322	69.812	36.725
Custos gerais	€/a	5.000	5.000	10.000	5.000
Custos totais	€/a	688.937	402.733	1.266.110	737.004
Custos de geração de energia elétrica	ct €/kWh _{el}	16,48	9,38	15,19	17,73
Lucro/prejuízo	€/a	81.781	91.322	59.812	31.725
Retorno sobre o ativo	%	14,0	14,4	8,4	7,1

8.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite evidenciar os fatores que têm maior influência sobre a economia de uma usina de biogás. As tabelas 8.15 e 8.16 mostram até que ponto o lucro se altera com a variação dos fatores pelos valores indicados.

Fatores como a produção de gás, o teor de metano, a eficiência elétrica e os custos do substrato, sobretudo

em usinas que utilizam culturas energéticas em elevada proporção, são responsáveis pela maior influência. A importância da variação dos custos de investimento é tanto maior quanto maiores forem os custos específicos de investimento da usina, ou seja, em usinas de menor porte têm maior peso que nas de maior porte. Efeitos menos acentuados se manifestam pela variação de fatores como o tempo trabalhado, o custo de manutenção e reparo e a venda de calor. Particular-

Tabela 8.14: Cálculo de custos da usina-modelo X

Cálculo de custos	Unidade	X Tratamento de gás
<i>Receitas</i>		
Gás injetado	m ³ /a kWh/a	2.053.155 22.581.100
Gás tratado	m ³ /a kWh/a	1.900.128 18.621.253
Gás bruto	m ³ /a kWh/a	3.652.570 19.021.710
<i>Custos variáveis</i>		
Custos do substrato	€/a	638.409
Insumos indiretos	€/a	361.763
Manutenção e reparo	€/a	61.736
Análises laboratoriais	€/a	2.880
Total de custos variáveis	€/a	1.064.788
<i>Margem de contribuição</i>	€/a	-1.064.788
<i>Custos fixos</i>		
Depreciação	€/a	267.326
Juros	€/a	75.358
Seguros	€/a	18.839
Mão de obra	homem-hora/dia	11,75
Mão de obra	homem-hora/ano	4.291
Mão de obra	€/a	64.358
Total dos custos fixos	€/a	425.881
<i>Receita s/custos diretos</i>	€/a	-260.897
Custos gerais	€/a	10.000
Custos Fornecimento de gás injetado	€/a	1.500.670
Custos específicos do gás injetado	€/m³ ct €/kWh	0,73 6,65
<i>Dos quais:</i>		
Custos de fornecimento do gás tratado	€/a	1.334.472
Custos específicos Fornecimento do gás tratado	€/m³ ct €/kWh	0,70 7,17
<i>Dos quais:</i>		
Custos de fornecimento do gás bruto	€/a	1.030.235
Custos específicos Fornecimento do gás bruto	€/m³ ct €/kWh	0,28 5,42

mente a situação da venda de calor seria diferente se fosse possível implementar um conceito com maior aproveitamento de calor e maiores preços.

A alteração da remuneração da eletricidade em 1 ct €/kWh também tem grande influência. Na prática, porém, a tarifa mal pode ser alterada. O exemplo mostra, por outro lado, que influência teria a perda do bônus de controle da poluição atmosférica. As usinas IV, V e VIII passariam, com isso, a ter prejuízo.

Na usina I, o melhoramento de um único fator não leva ao lucro. Somente a redução dos custos de investimento em 10%, combinada com o aumento da produção de gás em 5%, permitiria um resultado positivo.

Devido aos menores investimentos específicos e maiores taxas de remuneração, as usinas II e III apresentam melhor estabilidade, permanecendo na faixa de lucro mesmo no caso de alterações negativas de determinados parâmetros. Isso vale também para a usina de resíduos (VII), cuja boa estabilidade, porém, se deve ao baixo custo do substrato.

8.4 Eficiência econômica dos canais de utilização de calor selecionados

Além da receita proporcionada pela venda da energia elétrica, o uso da energia térmica do processo de cogeração é um fator cada vez mais importante para o sucesso econômico de uma usina de biogás. As quantidades de calor fornecidas são o fator determinante para saber se a utilização do calor é viável e que opções podem oferecer uma contribuição significativa. O bônus de cogeração da Lei Alemã de Energias Renováveis constitui a base das vantagens econômicas de se utilizar o calor [8-1].

No âmbito do concurso nacional "Soluções exemplares de usinas de biogás do futuro", promovido pela Agência Técnica de Biomassas Dedicadas (FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe), em 2008 a KTBL analisou os dados de 62 usinas de biogás. O resultado mostra que a quantidade do calor utilizado fora do processo de biogás representa, em média, apenas 39% da eletricidade gerada. Das usinas avaliadas, 26 utilizam o calor em edificações próprias (oficinas, escritórios), 17 realizam o aquecimento de estábulos, 16 abastecem instalações públicas como hospitais, piscinas e escolas, e 13 utilizam o calor em processos de secagem (cf. figura 8.1).

Residências, microrredes de gás, aquecimento distrital ou cultivo de plantas em estufas são consumidores de calor de importância secundária, pois tais aplicações são muito dependentes da localização da usina de biogás.

Tabela 8.15: Análise de sensibilidade das usinas-modelo I a V

Análise de sensibilidade Variação do lucro em €/a	I	II	III	IV	V
	30% esterco líquido, 70% culturas energéticas			100% culturas energéticas	Subprodutos
	75 kW _{el}	150 kW _{el}	350 kW _{el}	350 kW _{el}	500 kW _{el}
Alteração dos custos de investimento em 10%	6.965	9.722	14.413	14.779	15.193
Alteração dos custos do substrato em 10%	5.176	9.580	22.656	23.807	27.360
Alteração da produção de gás/teor de metano/ eficiência elétrica em 5%	6.784	13.793	23.309	21.953	33.358
Alteração da demanda de tempo de trabalho em 10%	1.078	1.781	3.346	3.396	3.312
Alteração das despesas de manutenção e reparo em 10%	1.290	1.766	5.737	5.817	7.366
Alteração da remuneração da energia elétrica em 1 ct €/kWh	6.011	12.035	27.948	28.001	39.998
Alteração da venda de calor em 10%	1.166	2.114	5.038	5.047	6.859

Tabela 8.16: Análise de sensibilidade para as usinas-modelo VI a IX

Análise de sensibilidade Variação do lucro em €/a	VI	VII	VIII	IX
	100% culturas energéticas 500 kW _{el}	Resíduos orgânicos 500 kW _{el}	100% culturas energéticas 1.000 kW _{el}	Fermentação a seco 500 kW _{el}
Alteração dos custos de investimento em 10%	17.628	18.772	29.420	19.891
Alteração dos custos do substrato em 10%	33.582	4.000	63.841	34.818
Alteração da produção de gás/teor de metano/ eficiência elétrica em 5%	31.465	17.368	43.049	31.381
Alteração da demanda de tempo de trabalho em 10%	3.961	3.457	6.128	6.436
Alteração das despesas de manutenção e reparo em 10%	7.898	7.650	15.279	6.174
Alteração da remuneração da energia elétrica em 1 ct €/kWh	40.135	40.018	80.091	40.026
Alteração da venda de calor em 10%	6.881	6.862	12.475	6.864

Os subcapítulos seguintes analisam e apresentam a rentabilidade dos canais de utilização do calor. O cálculo das receitas da cogeração, conforme a EEG de 2009, tomou por base 2011 como ano de entrada em operação, assim como no caso das usinas-modelo. Como os bônus previstos na EEG também estão sujeitos a uma redução anual de 1%, o valor do bônus de cogeração em 2011, consideradas as restrições mencionadas nas listas positiva e negativa, montou a 0,0294 € por kWh de eletricidade gerada.

8.4.1 Canal de utilização do calor para secagem

8.4.1.1 Secagem de cereais

O uso do calor do biogás para a secagem de cereais é uma opção restrita apenas a determinados períodos. A secagem dos cereais visa aumentar a sua durabilidade. Em média, 20% da safra tem de ser seca de uma umidade inicial de 20% para uma umidade residual de 14%. Isso se dá normalmente pelo auxílio de secadores móveis ou de batelada. A vantagem de se realizar a secagem de cereais utilizando o calor da cogera-

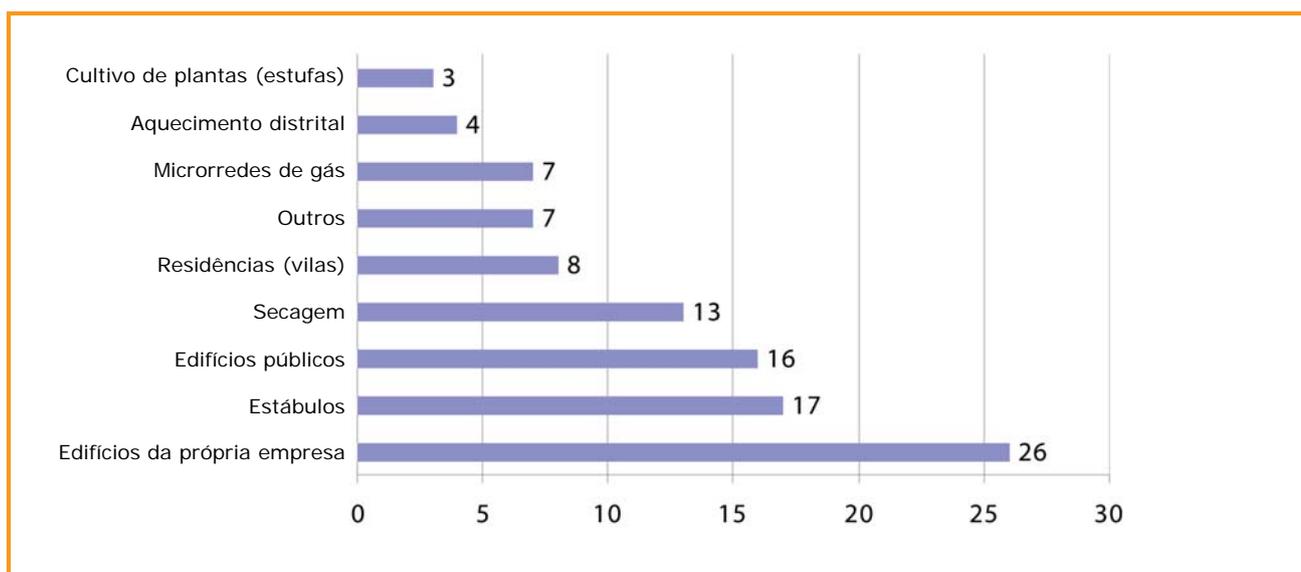


Figura 8.1: Canais de utilização do calor para usinas de biogás com processo de cogeração [8-7]

Tabela 8.17: Análise custo/benefício da secagem de cereais pelas fontes de calor biogás ou óleo de aquecimento

Parâmetro	Unidade	Secagem de cereais por:	
		Biogás	Óleo de aquecimento
Receitas			
Bônus de cogeração	€/a	470	0
Custos			
Total de custos variáveis	€/a	224	1.673
Total dos custos fixos	€/a	1.016	1.132
Total da mão de obra	€/a	390	390
Total de custos gerais	€/a	150	150
Total de custos	€/a	1.780	3.345
Custos específicos			
Custo por tonelada de cereal comercializável	€/t	1,66	4,24

ção é que permite aproveitar o calor residual no verão, época em que outros tipos de uso, tais como o aquecimento de edifícios, são desnecessários.

Os seguintes cálculos demonstram se a utilização do calor residual de cogeração é mais vantajosa que opções baseadas em vetores energéticos fósseis:

Pressupostos:

- A secagem de cereais ocorre por meio de secadores de batelada;
- 20% da safra colhida é submetida a secagem de 20% para a umidade residual de 14%,

- a quantidade colhida é de 800 t/a – a quantidade submetida a secagem é de 160 t/a,
- o equipamento de secagem opera 20 horas por dia durante 10 dias por ano.

Para secar 160 t/a de cereais no período indicado, é calculada uma potência de 95 kW para o trocador de calor. Assim, anualmente são necessários 18.984 kWh de energia térmica.

Se, por exemplo, for considerado um trabalho térmico de 3.364.804 kWh/a para a usina-modelo III, é utilizado somente aproximadamente 0,6% do calor gerado pela usina de biogás para a secagem de 160 t de cereais. A energia utilizada na secagem equivale à energia fornecida por aproximadamente 1.900 litros de óleo de aquecimento.

A tabela 8.17 exibe a comparação das receitas e dos custos de secagem de cereais por meio das fontes de calor biogás e óleo de aquecimento.

Assumindo um preço de 0,70 €/l de óleo de aquecimento, pode-se economizar aproximadamente 1.318 €/a mediante a substituição de óleo pelo biogás. Esse item é o motivo pelo qual os custos variáveis da secagem com calor oriundo do biogás sejam muito inferiores aos do óleo de aquecimento. Se o cálculo incluir o bônus de cogeração de aprox. 470 € para a eletricidade equivalente, resulta, para a secagem de cereais por calor residual de cogeração, uma vantagem de custo de 2.035 € por ano. Em relação à safra, os custos de secagem por biogás são de 1,66 € por tonelada de cereal comercializável, comparados a 4,24 €/t na secagem por óleo de aquecimento.

Tabela 8.18: Análise custo/benefício do processo de secagem de cereais com calor residual do biogás de cogeração, sem considerar o bônus de cogeração ([8-9], modificado conforme [8-8])

	Unidade	150 kW _{el} Secador em cascata	500 kW _{el} Secador em cascata	500 kW _{el} Secador de alimentação e viragem	150 kW _{el} Secagem móvel	500 kW _{el} Secagem móvel
Pressupostos						
Em lugar de um gerador de calor (óleo de aquecimento), é utilizado um trocador de calor para transferir a energia térmica da usina de cogeração para o equipamento de secagem						
Quantidade de calor utilizável da usina de biogás após dedução do aquecimento do biodigestor	MWh/a	1.136	3.338	3.338	1.136	3.338
Fração de calor residual utilizado da usina de biogás ^a	%/a	9	9	13	9	9
Calor residual aproveitado	kWh	102.240	300.420	433.940	102.240	300.420
Quantidade de produto processada (cereais)	t MF/a	1.023	3.009	4.815	1.023	2.972
Potência térmica instalada	kW	88	283	424	88	283
Total de investimentos ^b	€	48.476	93.110	140.010	25.889	64.789
Custos						
Investimento e reparo	€/a	4.966	10.269	15.468	3.025	8.182
Energia elétrica	€/a	844	1.878	2.450	738	1.633
Mão de obra	h/a	260	260	293	326	456
	€/a	3.658	3.658	4.116	4.573	6.402
Seguros	€/a	251	479	721	134	332
Total de custos	€/a	9.979	16.544	23.048	8.796	17.005
Receita sem bônus de cogeração						
Aumento de valor pela secagem da mercadoria ^c	€/a	13.105	38.550	61.684	13.105	38.076
Bônus de cogeração	€/a	0	0	0	0	0
Total de receitas		13.105	38.550	61.684	13.105	38.076
Lucro sem bônus de cogeração						
Lucro	€/a	3.126	22.006	38.636	4.309	21.071
Ponto de equilíbrio	€/t MF	3,06	7,31	8,02	4,21	7,09

a. Período de secagem: julho e agosto; nesse período, 50% da capacidade térmica da usina de biogás é aproveitada em secadores móveis e em cascata; no caso da secagem por alimentação e viragem, 75% da capacidade é utilizada.

b. Investimento do secador, de forma a atender aos requisitos do Anexo 3 da EEG: custos adicionais de 100,00 €/kW da potência térmica instalada

c. Aumento de valor proporcionado pelo aumento da durabilidade, maiores chances de comercialização: 10 €/t MF.

Se a secagem de cereais for o único processo de secagem utilizado, deve-se verificar e atender aos requisitos I.3 do direito ao recebimento do bônus de cogeração da EEG 2009: "...e os custos adicionais ocasionados pelo fornecimento de calor (...) devem ser de no mínimo 100 € por quilowatt de potência térmica". Portanto, investimentos adicionais podem ser necessários para esse processo de secagem antes que a usina possa se qualificar para o bônus de cogeração. Isso pode, no entanto, elevar os custos para 3.023 €/a, compensando a vantagem de custo do uso do calor a

partir do biogás e elevando os custos específicos de secagem por biogás para 3,24 € por tonelada de cereais comercializáveis, perante 4,24 €/t propiciados pelo óleo de aquecimento.

O cálculo ilustrativo mostra que o uso dessa pequena parcela de calor residual para a secagem de cereais como único uso do calor não é viável economicamente. Deve-se verificar se esse uso pode ser implementado como medida sazonal complementar a outros conceitos de uso do calor.

Tabela 8.19: Análise custo/benefício do processo de secagem de cereais com calor residual do biogás de cogeração, considerando o bônus de cogeração ([8-9], modificado conforme [8-8])

	Unidade	150 kW _{el} Secador em cascata	500 kW _{el} Secador em cascata	500 kW _{el} Secador de alimentação e viragem	150 kW _{el} Secagem móvel	500 kW _{el} Secagem móvel
Receita com bônus de cogeração						
Aumento de valor pela secagem da mercadoria ^a	€/a	13.105	38.550	61.684	13.105	38.076
Bônus de cogeração	€/a	2.576	7.805	11.274	2.576	7.805
Total de receitas		15.681	46.355	72.958	15.681	45.881
Lucro com bônus de cogeração						
Lucro	€/a	5.702	29.811	49.910	6.885	28.876
Ponto de equilíbrio	€/t MF	5,57	9,91	10,37	6,73	9,72

a. Razão potência/calor da usina de 150 kW: 0,857; razão potência/calor da usina de 500 kW: 0,884

Tabela 8.20: Economia de óleo de aquecimento em processos de secagem de cereais com calor residual do biogás

	Unidade	150 kW _{el} Secador em cascata	500 kW _{el} Secador em cascata	500 kW _{el} Secador de alimentação e viragem	150 kW _{el} Secagem móvel	500 kW _{el} Secagem móvel
Substituição de vetores energéticos fósseis						
Quantidade de óleo de aquecimento economizada ^a	l/a	14.700	34.700	51.410	11.760	34.235
Custos economizados de óleo de aquecimento ^b	€/a	10.290	24.290	35.987	8.232	23.965

a. Economia de óleo de aquecimento que seria utilizado como fonte de calor fóssil na secagem. Eficiência do gerador de ar quente com óleo de aquecimento 85%

b. Preço do óleo de aquecimento: 0,7 €/l

Se forem necessárias grandes quantidades de calor para fins de secagem (p. ex. pelo oferecimento de serviços de secagem), confirma-se a viabilidade econômica, como mostrado pelos exemplos de cálculo de [8-8]:

Assume-se que 9% da quantidade de calor disponível das usinas de biogás pode ser utilizada em cerca de 50 dias em julho e agosto, durante o verão europeu. Também se assume que os custos adicionais do fornecimento de calor são de no mínimo 100 € por quilowatt de potência térmica, de forma que pode se incluir o recebimento do bônus de cogeração como item de receita.

A tabela 8.18 e a tabela 8.19 mostram que, nessas condições, mesmo em pequenas usinas de biogás (150 kW) é possível atingir um lucro considerável, assumindo um aumento de valor do cereal de 10 €/t MF devido à melhor durabilidade e às melhores chances de comercialização. A inclusão apenas do bônus de cogeração, porém, não é suficiente para cobrir os custos de secagem (cf. tabela 8.19).

Se o óleo de aquecimento for substituído pelo biogás como fonte de calor, a economia de custo com óleo de aquecimento sozinha é capaz de cobrir os custos totais da secagem por calor residual da usina de cogeração (ver tabelas 8.18 e 8.20).

Comparando as tecnologias, a expectativa de lucro da secagem móvel é equivalente à da secagem em cascata, apesar de aquela exigir um investimento 55% inferior a esta. Isso se deve aos custos de mão de obra mais elevados da secagem móvel (p. ex. pela troca do vagão), que varia de 25% a 75% conforme o tamanho da usina.

8.4.1.2 Secagem de biofertilizantes

A secagem de biofertilizantes foi classificada como um processo de apoio à otimização do uso do calor de processos de cogeração e, com isso, admitida na lista positiva da EEG (2009). Essa variante de utilização do calor dá direito ao recebimento do bônus de cogeração se o produto tratado for um adubo. Essa forma de

uso do calor tem um efeito positivo sobre a economia da usina de biogás somente se não houver outras opções lucrativas de utilização do calor, uma vez que as receitas se restringem ao bônus de cogeração. A redução dos custos de deposição do adubo ou o aumento de valor pelo processo de secagem só podem ser atingidos se houver conceitos de aproveitamento e comercialização do produto da secagem.

8.4.2 Canal de utilização do aquecimento de estufas

Estufas são capazes de absorver grandes quantidades de energia térmica por um longo período, o que, por um lado, permite receitas contínuas, e por outro lado, proporciona ao operador da estufa menores custos de obtenção do calor. O exemplo a seguir apresenta o fornecimento de calor a diferentes regimes de cultivo e estufas com duas dimensões diferentes.

O cultivo de plantas ornamentais distingue três faixas de temperatura: a "fria" ($< 12\text{ }^{\circ}\text{C}$), a "temperada" ($12 - 18\text{ }^{\circ}\text{C}$) e a "quente" ($> 18\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Para o cálculo da economicidade, será considerada uma usina de biogás com potência elétrica instalada de 500 kW. O pressuposto é de que ao todo 30% do calor produzido pela usina de cogeração é utilizado no aquecimento do biodigestor. Assim, está disponível para fins de aquecimento cerca de 70% do calor gerado, o que equivale a aproximadamente 3.200 MWh térmicos por ano.

A tabela 8.21 compara a demanda de calor dos diferentes regimes de cultivo em estufas com área de 4.000 m² e 16.000 m² com o aproveitamento do calor residual de uma usina de cogeração de 500 kW_{el} em função do regime de cultivo e tamanho da estufa.

No exemplo de cálculo, em vez do fornecimento de calor por óleo de aquecimento, é presumido o fornecimento de calor pela usina de cogeração. O calor residual da usina cobre o consumo básico e o aquecimento com óleo assegura picos de consumo. Os respectivos custos de cobertura da carga de pico foram considerados nos cálculos (cf. tabela 8.22).

O calor é coggerado na forma de água quente e transportado por meio de uma longa canalização local de calor até a estufa.

Embora o aquecimento de estufas esteja listado como processo de aproveitamento de calor na lista positiva da EEG (2009), o direito ao bônus de cogeração só vale se a substituição de uma utilização de calor com fonte fóssil de energia ocorrer na mesma medida e os custos adicionais de fornecimento do calor forem de no mínimo 100 € por kW de potência térmica.

No cálculo ilustrativo a seguir, os custos adicionais do fornecimento de calor pela usina de biogás excedem a exigência mínima da EEG de 100 € por kW de potência térmica e, portanto, o bônus de cogeração é incluído como item de receita.

Além disso, assume-se que os operadores de usinas de biogás vendam o calor por 0,023 €/kWh_{th}. Disso resultam receitas extras da venda do calor, além do bônus de cogeração.

Para os operadores de estufas cultivando plantas ornamentais na faixa "fria", supondo os custos do calor anteriormente mencionados de 0,023 €/kWh, resultam vantagens econômicas da ordem de 10.570 ou 78.473 €/a, comparado com o aquecimento unicamente por óleo, mesmo em vista dos investimentos adicionais de canalização do calor (cf. tabela 8.22).

O cálculo foi baseado em um preço do óleo de aquecimento de 70 ct. €/l.

Nos regimes de cultivo "temperado" e "quente", o potencial de economia aumenta em função da produção de calor mais elevada, com um aumento mínimo dos custos fixos a até 67%.

8.4.3 Canal de utilização do calor – rede municipal de calor

A alteração da Lei Alemã de Energias e Calor Renováveis, a Lei de Geração Combinada de Energia e Calor e associadas possibilidades de fomento dos Estados e distritos, e os créditos a juros baixos formam o quadro legal básico para a utilização, ampliação e construção de redes de calor.

Na tabela 8.23 se encontram os dados característicos de um município a ser abastecido com calor, em um exemplo de planejamento. São comparados os fornecimentos de calor por combustão de cavacos e por calor residual de uma usina de biogás. Presume-se que uma caldeira alimentada por cavacos ou uma usina de biogás cubram a demanda básica (cerca de 30% da demanda de potência), e uma caldeira de óleo atenda aos picos de carga (cerca de 70% da demanda de potência). O município é composto de 200 residências, uma escola e um edifício administrativo. O calor é distribuído aos consumidores por meio de uma rede de água quente. Com base nisso, obtém-se uma demanda de potência calorífica do município de 3,6 MW. A caldeira alimentada por cavacos e a usina de biogás, portanto, devem ser projetadas com uma capacidade mínima de geração de calor de 1,1 MW.

Para os exemplos, assumiram-se investimentos da ordem de 3,15 mi € (biogás) e 3,46 mi € (cavacos). O investimento para a usina de biogás não é contado

Tabela 8.21: Demanda anual de calor de estufas, com diferentes regimes de cultivo e dimensões, e aproveitamento do calor residual de uma usina de biogás de 500 kW_{el}

Regime de cultivo	Planta ornamental – frio		Planta ornamental – temperado		Planta ornamental – quente	
	4.000	16.000	4.000	16.000	4.000	16.000
Área da estufa [m ²]	4.000	16.000	4.000	16.000	4.000	16.000
Quantidade de calor necessária para o aquecimento [MWh/a]	414	1.450	1.320	4.812	1.924	6.975
Potencial de calor residual aproveitado de uma usina de biogás com 500 kW _{el} [%]	13,3	46,4	42,2	100	61,6	100

Tabela 8.22: Comparação de custos do fornecimento de calor por meio do aquecimento a óleo e calor residual de usina de biogás/cogeração a exemplo de duas dimensões de estufas em regime de cultivo "frio"

	Unidade	Área da estufa			
		4.000 m ²		16.000 m ²	
		Óleo de aquecimento	Biogás	Óleo de aquecimento	Biogás
Investimento	€	86.614	141.057	155.539	216.861
Total de custos variáveis (reparos e custos de combustível)	€/a	37.770	22.235	129.174	45.105
Total de custos fixos (depreciação, juros, seguros)	€/a	7.940	2.930	14.258	19.879
Total da mão de obra	€/a	390	390	390	390
Total de custos gerais	€/a	500	500	500	500
Total de custos	€/a	46.625	36.055	144.348	65.874
Diferença aquecimento óleo/biogás	€/a	10.570		78.473	
Economia aquecimento com biogás x óleo	%	22,7		54,4	

Tabela 8.23: Valores hipotéticos e característicos para o fornecimento de calor em uma rede local municipal de calor, com cobertura básica pelo calor de usinas de biogás/cogeração e forno de queima de cavacos [conforme 8-10]

	Unidade	Calor de usina de biogás/cogeração	Cavaco
Número de residências	Número	200	
Escola	Escolares	100	
Edifícios de escritórios/municipais	Empregados	20	
Demanda de potência térmica total	MW	3,6	
Demanda de potência térmica biogás/cavacos	MW/a	1,1	
Demanda de potência térmica caldeira de óleo	MW/a	2,6	
Quantidade total de calor	MWh/a	8.000	
da qual calor residual de biogás/calor da queima de cavacos	MWh/a	5.600	5.200
Comprimento da rede	m	4.000	
Demanda anual de calor	kWh/a	6.861.000	

Tabela 8.24: Demanda de investimentos e custos de fornecimento de calor para a rede municipal de calor em dependência do preço de venda do calor da usina de biogás/cogeração [8-10]

Preço de venda	Unidade	Calor residual da usina de cogeração			Cavaco
		1	2,5	5	
Demanda de investimentos ^a	€	3.145.296			3.464.594
Demanda de investimentos p/ distribuição de calor ^b	€	2.392.900			
Custos	€/a	571.174	655.594	796.294	656.896
Custos de fornecimento de calor	ct €/kWh	8,32	9,56	11,61	9,57
Dos quais custos de distribuição de calor ^b	ct €/kWh	3,17			

a. Inclui edificações para equipamentos e estruturas de aquecimento, componentes da usina para cobrir picos de demanda (caldeira e depósito de óleo), componentes compartilhados (depósito de emergência, instalações elétricas, sistemas de medição e controle, instalações sanitárias, equipamentos de ventilação e climatização), rede de aquecimento distrital, custos extras de construção (planejamento e licenciamento). No caso de uso de cavacos, considerou-se o investimento adicional para o armazenamento e queima da biomassa.

b. A usina de biogás não faz parte do investimento. O calor é transferido da usina de cogeração para a rede aqui considerada.

Tabela 8.25: Classificação qualitativa dos diferentes canais de utilização do calor

Canal de utilização do calor/ consumidor de calor	Investimentos	Quantidade de calor transferido	Fornecimento de calor (continuidade da transferência de calor)	Bônus de cogeração	Substituição de vetores energéticos fósseis
Secagem					
- Cereais	++/+	0	-	(-) ^a	+
- Biofertilizantes	0	++	++	+	-
- Cavaco	+/0	+	0	(-) ^a	0/-
Aquecimento					
- Cultivo de plantas (estufas)	+/0	++	0 ^b	+	++
- Residências	-	+/ ⁺⁺ c	+ ^d	+	++
- Indústrias	+/0	+/ ⁺⁺ c	++ ^d	+	++
- Estábulos	+/0	0 ^e	0	+	+
Resfriamento					
- Indústrias de laticínios	- ^f	++	++	+	++
- Pré-resfriamento do leite	- ^f	0	+	-	-

++ = muito bom (no caso de investimentos: muito baixo)

+ = bom (no caso de investimentos: baixo)

0 = médio (no caso de investimentos: neutro)

- = ruim (no caso de investimentos: elevado a muito elevado)

a. O direito ao bônus de cogeração só se efetiva se os custos adicionais ocasionados pelo fornecimento de calor forem de no mínimo 100 € por quilowatt.

b. Fornecimento de calor somente nos meses de inverno, podendo variar muito conforme a faixa de temperatura do regime de cultivo e dimensões da estufa

c. Conforme a constituição das residências a serem aquecidas. Recomendável em áreas de alta densidade populacional cujos edifícios tenham mau isolamento, bem como para grandes consumidores municipais e comerciais.

d. Somente para atender à demanda básica. Picos de demanda devem ser supridos por outras fontes de energia.

e. Quantidade de calor transferido restrita pelos limites do Anexo 3 da EEG.

f. Investimento referente ao sistema de refrigeração por absorção.

como custo de geração de calor, o que explica o porquê do reduzido investimento. A canalização local de calor (com canalização principal) e as estações de transferência e conexões residenciais respondem, com 70%, pela maior parte dos investimentos. O cálculo considerou uma demanda média de investimentos

para a canalização local de calor de 410 €/m, dos quais apenas 50 a 90 €/m devidos ao material da canalização de calor.

Conforme o preço de venda da usina de cogeração com biogás, os custos da geração de calor são de 8,3 a 11,6 ct €/kWh. O custo da distribuição de calor repre-

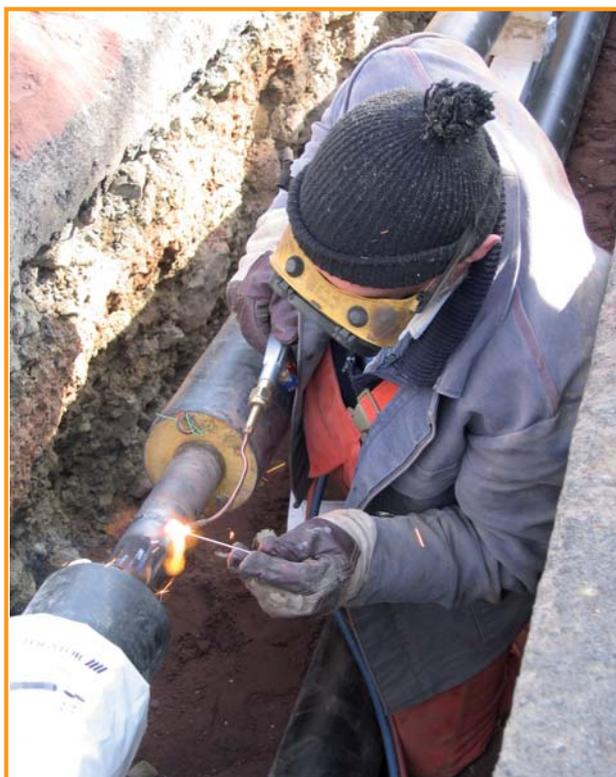
senta sozinho 3,17 ct €/kWh. O fornecimento do óleo de aquecimento, para os picos de demanda, é outro importante item de custos. Esse exemplo mostra que o calor residual coggerado pode custar aprox. 2,5 ct €/kWh para poder concorrer com uma usina movida a cavacos.

8.5 Classificação qualitativa de diferentes canais de utilização de calor

A tabela 8.25 dá uma visão geral sobre a classificação qualitativa de diferentes canais de utilização de calor.

8.6 Fontes bibliográficas

- [8-1] EEG (2009): Lei Alemã de Energias Renováveis (Erneuerbare-Energien-Gesetz)
- [8-2] Fraunhofer UMSICHT (2008): Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Resultados do estudo de mercado 2008 – 2008, Oberhausen
- [8-3] Gemmeke, B. (2009): – depoimentos pessoais
- [8-4] KTBL (2005): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Darmstadt
- [8-5] FNR (2005): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow
- [8-6] vTI (2009): Bundesmessprogramm zur Bewertung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen, Abschlussbericht Parte 1, Braunschweig
- [8-7] Döhler, S. e H. Döhler (2009): Beispielhafte Biogasprojekte unter dem neuen EEG im Rahmen des Bundeswettbewerbs Musterlösungen zukunftsorientierter Biogasanlagen. Atas do Congresso Anual da Fachverband Biogas e. V.
- [8-8] Gaderer, M., Lautenbach, M.; Fischer, T.; Ebertsch, G. (2007): Wärmenutzung bei kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern), Augsburg, alterada
- [8-9] KTBL (2009): Faustzahlen Biogas. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), Darmstadt
- [8-10] Döhler H. et al. (2009): Kommunen sollten rechnen; Joule 01.2009



9

Organização Operacional

O estabelecimento do biogás como ramo em uma empresa agrícola ou em um consórcio de empresas, ou a conversão de uma empresa para a produção de biogás, se justifica principalmente pelos seguintes argumentos:

- Estabelecimento de um novo ramo de atividade para ampliar o leque de produtos
- Obtenção de uma renda estável pela garantia de preço proporcionada pela eletricidade do biogás
- Disponibilização de liquidez ao longo do ano fiscal
- Utilização da terra independente do mercado
- Aproveitamento de produtos principais e subprodutos para fins energéticos
- Redução de emissões e odores do armazenamento e deposição de adubos orgânicos
- Melhoramento da disponibilidade dos nutrientes de adubos orgânicos para as plantas
- Fornecimento autônomo de energia
- Melhoria da imagem da empresa.

Antes de optar pela geração de biogás, deve-se pesar as seguintes possibilidades de geração e aproveitamento de gás, conforme a disposição do investidor ao risco (cf. figura 9.1):

Opção 1: Fornecimento de substrato a uma usina de biogás existente ou a ser construída; baixos riscos e investimentos na operação da usina, mas menor participação no valor agregado do biogás.

Opção 2: Construção de uma usina de biogás própria ou consorciada, com conversão própria de biogás em eletricidade ou venda do biogás gerado, p. ex. para uma estação de tratamento de gás; risco e investimento elevados da operação da usina, mas com elevada parcela no valor agregado do biogás.

A opção 1 do ramo do biogás é comparável à produção comercial de cultivos agrícolas. No entanto, principalmente no caso da produção de silagem de milho, em função do teor de MS da matéria verde de 30% – 40% e da durabilidade do material ensilado, o seu transporte pode se dar no máximo 24 horas após a



Figura 9.1: Opções do empresário agrícola no ramo do biogás

retirada. Assim, se o silo se localizar no produtor, assume-se que o fornecimento atenda apenas ao mercado regional.

Na venda a partir do campo, comum nos Estados alemães do Sul, a capacidade de ensilagem fica a cargo do responsável pelo processamento, ou seja, da usina de biogás. Também nesse caso é possível atender apenas ao mercado regional em função da capacidade de transporte.

Essa regionalização é beneficiada também pelo custo de transporte no aproveitamento dos biofertilizantes, armazenados principalmente na área da usina de biogás. Do ponto de vista do operador da usina, o objetivo é firmar contratos de longo prazo para garantir que a demanda de substrato seja relativamente constante. Principalmente em áreas marginais e no caso de produções variáveis, o cumprimento do estipulado no contrato pode ser problemático para o agricultor.

A opção 2 do ramo de biogás, por outro lado, compara-se à construção de instalações para a criação de gado. O "beneficiamento" se realiza na empresa com o objetivo de obter lucro e ampliar a produção ou os investimentos no futuro. Para isso, são necessários investimentos adicionais da ordem de 6.000 a 8.000 €/ha, dado um prazo vinculado de 20 anos para o capital e a terra. O objetivo é obter uma renda adequada do capi-

tal investido. É possível verificar a viabilidade desse objetivo por meio de um cálculo de investimentos (cf. capítulo 8.2.3).

A construção de uma usina de biogás agrícola, principalmente após a alteração de 2009 da EEG, tem como ponto de partida a disponibilidade de adubo orgânico, a quantidade de calor aproveitável, a área de terra necessária para o fornecimento de substrato e o potencial de aproveitamento dos biofertilizantes.

Especificamente, é necessário determinar quanto adubo orgânico é originado e o teor de matéria orgânica seca (MS) (valor de referência: 0,15 – 0,2 kW/UGM). Valores de referência tais como os de órgãos estaduais ou do KTBL podem ser utilizados para determinar a quantidade originada, caso se conheçam os teores de MS. É bom observar que o valor calculado com uma única amostra de esterco normalmente não é representativo.

Além disso, ao analisar as distâncias de transporte, deve-se observar as quantidades de resíduos agrícolas tais como restos de ração, camadas sedimentadas de silagem, etc., e, quando houver, subprodutos puramente vegetais, disponíveis como substratos de custo zero, considerando o momento em que elas ocorrem. Em função da regulamentação da remuneração pela EEG, o teor de MS dos subprodutos puramente vegetais tem grande importância, pois, para a produção de eletricidade a partir desses produtos, uma quantidade fixa de eletricidade, baseada na entrada de matéria verde, não se qualifica para o bônus NawaRo (cf. capítulo 7.3.3.2).

Se for cogitada a fermentação a partir de resíduos, deve-se verificar a disponibilidade de resíduos orgânicos, as distâncias de transporte, as exigências de conservação, a inocuidade da biologia da fermentação, a ausência de riscos do ponto de vista legal, bem

como a necessidade de higienização (cf. capítulo 10.3.5).

No que tange ao aproveitamento de culturas agrícolas, ao planejar a sua usina de biogás agrícola o agricultor deve considerar cuidadosamente que áreas da terra ele pretende utilizar para o biogás, e que culturas e quais produções elas terão. Como estimativa aproximada, parte-se de um valor típico de 0,5 ha/kW_{el}. Deve ser dada preferência a espécies de elevada produtividade e baixo custo por unidade de matéria orgânica seca ou por m³ de metano, considerando as devidas questões relacionadas a rotações de culturas e administração da mão de obra. Todavia, o cultivo de outras silagens de planta inteira, p. ex., pode ser mais vantajoso que o milho se permitir compensar picos de trabalho na colheita desse grão e possibilitar a limpeza precoce das áreas, p. ex. para o plantio da colza.

O uso da área inteira da fazenda como ração básica destinada à criação de gado ou para a produção de substrato para o biogás normalmente não é uma solução recomendável, pois isso impediria a participação no mercado. Além disso, fatores relacionados à rotação de culturas em fazendas cultiváveis são um argumento contra tal solução.

A compra de biomassa é uma prática comum quando as próprias áreas não permitem produzir o substrato em quantidade suficiente. Mesmo caso sejam firmados contratos de longo prazo, não raro com cláusulas de preços flutuantes, é menor a segurança material e econômica da usina de biogás. O mercado regional pode ser influenciado substancialmente pela construção de outras usinas na região ou por alterações nos preços agrícolas, como ocorrido em 2007/08. A tabela 9.1 mostra um resumo do planejamento do substrato e das condições básicas a serem observadas.

Tabela 9.1: Condições básicas a observar no planejamento de substrato

Planejamento de substrato	Condições básicas
<ul style="list-style-type: none"> • Adubo orgânico disponível (com especificações da MS e MOS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de armazenamento disponível (para silagens, biofertilizantes)
<ul style="list-style-type: none"> • Ocorrência de resíduos agrícolas na empresa 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda de calor da empresa ou de consumidores no entorno (quantidades, variações anuais)
<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de terra, produções e custos de cultivo de espécies energéticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Pontos de injeção de energia elétrica e calor • Edificações aproveitáveis
<ul style="list-style-type: none"> • Resíduos da indústria de ração e alimentos^a 	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas para aproveitamento de biofertilizantes • Cumprimento da BioAbfV • Distâncias de transporte para substratos e utilização de biofertilizantes • Cálculo da remuneração da injeção pelo uso de substratos^a

a. Considerar os requisitos da EEG (2009) para o cálculo do valor da remuneração da injeção.

Além de considerar fatores como o fornecimento de substrato, o potencial de aproveitamento dos biofertilizantes e da quantidade adequada de calor a utilizar, o dimensionamento da usina de biogás também leva em conta aspectos técnicos, legais, administrativos e da remuneração. A escolha das dimensões da usina sem a observância das características do local (demanda de calor, aproveitamento de esterco para biogás, estruturas e parâmetros operacionais, etc.), da disponibilidade do substrato e da administração da mão de obra, como já ocorreu antigamente, não é recomendável e pode ocasionar problemas estruturais e econômicos de grande impacto.

Em suma, deve-se ter em mente que, ao integrar uma usina de biogás nas atividades da empresa agrícola, os seguintes fatores têm papel preponderante:

- **Demanda de terra** e prazos vinculados (20 anos), que em certos casos podem ser influenciados pela venda de substrato.
- **Esquema de adubação:** possível aumento da quantidade de material de deposição e de nutrientes no ciclo de cultivo.
- **Utilização de recursos básicos:** possibilidade de uso de silos, tanques de esterco, ...
- **Administração da mão de obra:** abrange a geração, colheita e armazenamento ou obtenção da matéria-prima (substrato); atividades de operação da usina como o preparo do substrato, carregamento, monitoramento de processos, supervisão, manutenção e eliminação de falhas e danos; retirada dos restos da digestão; tarefas administrativas (exemplo: produção, colheita e armazenamento de cereais: 6...8 h/ha comparadas à silagem de milho: 13...15 h/ha).

O risco do empreendimento pode ser mitigado pela administração da usina em consórcio. Para tal, pode-se abrir uma das diversas formas de sociedade visando aproveitar a biomassa, como a GbR alemã (Gesellschaft bürgerlichen Rechts – Sociedade de Direito Civil), permitindo obter uma renda básica de matérias-primas vegetais e esterco, bem como de outras substâncias como gorduras (cf. capítulo 9.2.2).

A seguir são elencados os fatores que mais influenciam a reestruturação de uma empresa.

9.1 Reestruturação da empresa – perspectivas e abordagens para a otimização

O planejamento e a construção da usina exigem a participação do empresário agrícola em diversos níveis. A lista a seguir sintetiza as decisões mais importantes

e as atividades do empresário para planejar e integrar a usina nas operações agrícolas de seu empreendimento:

- Escolha do local
- Esclarecimento da conexão elétrica para a injeção da eletricidade gerada na rede de distribuição, incluindo a instalação de um novo transformador, geralmente necessário
- Esclarecimento da conexão térmica da usina à empresa
- Esclarecimento de como os aspectos relacionados ao substrato serão integrados à usina
- Processo de licenciamento (preparo do pedido)
- Pareceres (levantamento edáfico do local, ensaios de estática de reservatórios e novas edificações, plano de segurança e saúde para o canteiro de obras, liberação pela agência de inspeção, ...)
- São necessárias ampliações de estruturas de armazenamento para comportar o aumento de biofertilizantes de cossustratos
- Equipamentos do canteiro de obras (iluminação externa, cercas, placas, caminhos, canalização de água, plantios de compensação, ...)
- Aquecimento da usina e eliminação de falhas na fase de partida, com supervisão no primeiro ano de operação.

9.1.1 Definição de um local adequado para a usina

A figura 9.2 a seguir aborda todos os parâmetros relevantes para a escolha do local. Quanto maior for o porte da usina, mais importante será a escolha do local ideal. Especialmente importantes são as opções de distribuição e utilização da energia gerada (cf. capítulo 11.2.2).

Deve-se considerar também que o transporte de calor só é economicamente viável a curtas distâncias, e o transporte de eletricidade em faixas de baixa tensão implica perdas consideráveis de potência, o que tem impacto negativo sobre o retorno econômico.

Outro ponto a considerar na escolha do local é a viabilidade do transporte de substratos e biofertilizantes em vista das dimensões da usina (cf. capítulo 11.2.2). Igualmente importante é checar a disponibilidade a longo prazo da quantidade e da qualidade de substrato de que a usina necessita. Além disso, a regulamentação de licenciamento exige que se observem determinadas distâncias entre as áreas de criação de gado, de residências e de recursos hídricos sensíveis. O planejamento deve levar em conta etapas futuras de ampliação.

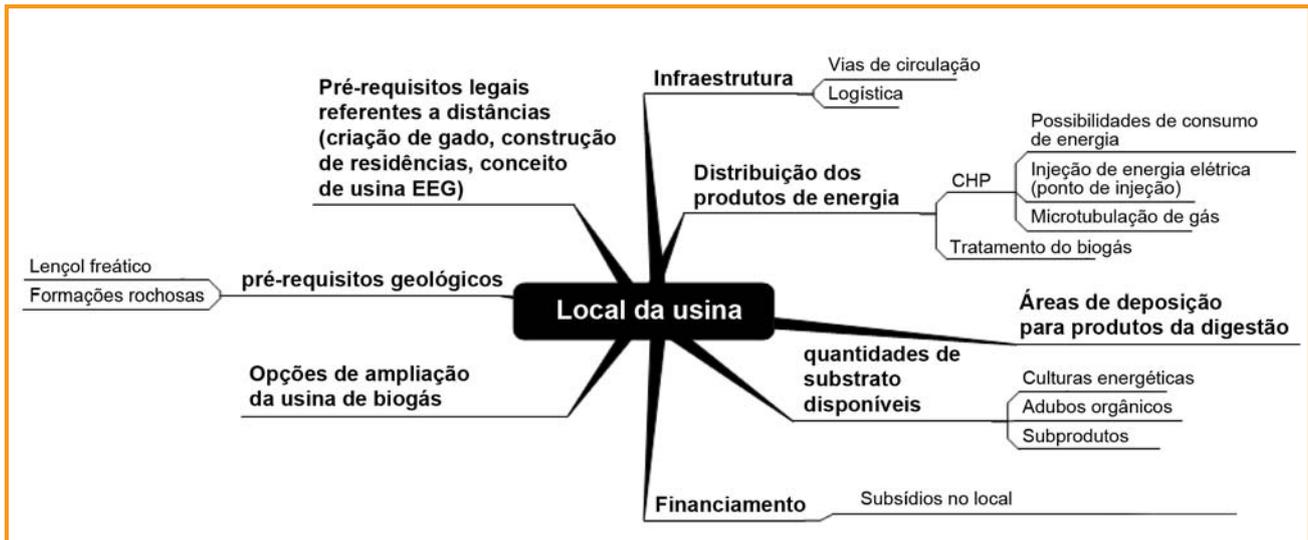


Figura 9.2: Fatores de influência sobre a escolha do local (CHP: geração combinada de eletricidade e calor)

Além dos parâmetros de planejamento administrativos, a definição do local de construção deve contemplar fatores geológicos tais como o nível do lençol freático e o estado do solo (tipo de solo, conteúdo de rocha, etc.). O financiamento da usina pode tirar proveito de oportunidades de fomento oferecidas para o local da usina pela administração municipal, distrito ou Estado federado.

9.1.2 Impacto da usina de biogás na rotação de culturas

A geração de biomassa pode exigir que a rotação de culturas tenha de ser adaptada. O foco passa a ser a produção de plantas o mais próximo possível do local de geração de gás a fim de reduzir os custos de transporte. Esse objetivo, porém, nem sempre é fácil de atingir em virtude do porte da usina, da quantidade necessária de substrato (culturas energéticas) e de razões pertinentes à rotação de culturas. Assim, para o operador de usina que também mantém uma criação de suínos, em vez de alimentar seus porcos com a cevada de inverno pode ser mais vantajoso realizar a sua colheita mais cedo, ainda no estágio pastoso, transformando-a em silagem de planta inteira para a geração de biogás. Nesse caso, alimentam-se os suínos com ração de cevada comprada. Em função da precoce safra de cevada, em localizações favoráveis há a possibilidade de plantar milho para silagem como segundo cultivo ou cultivo tardio com variedades precoces. O plantio de milho como cultura principal ocasiona o efeito colateral de permitir utilizar ecologicamente os biofertilizantes produzidos no cultivo da lavoura por um período prolongado.

Com a alteração da rotação de culturas visando gerar biogás, é possível manter as lavouras verdes quase o ano inteiro, o que significa um efeito positivo do ponto de vista da utilização do nitrogênio.

Conforme a umidade do solo no momento da colheita da silagem do milho, o trânsito de veículos sobre o solo em condições desfavoráveis pode ter impacto negativo sobre a estrutura do solo, principalmente no caso da colheita do milho como segunda safra.

A prática consagrou uma ampla mescla de substratos em usinas de biogás, tanto do ponto de vista agrícola como da biologia da fermentação. O cultivo de SPI de cereal permite a limpeza precoce das áreas e possibilita, p. ex., que o plantio da colza se dê no tempo certo. Por ser um cultivo de alta produtividade, o milho pode aproveitar muito bem os biofertilizantes na primavera. Recomenda-se o uso, p. ex., de grãos de cereais como meio de controlar a produção de gás. Além disso, a compra de grãos de cereais permite compensar oscilações da produção de substratos de cultivo próprio, evitando maiores distâncias e quantidades de transporte.

9.1.3 Demanda de terra e tempo de trabalho

Na integração do ramo de biogás, além das questões da administração da mão de obra, condicionadas pelas alterações da estrutura de cultivo (p. ex. pelo cultivo de milho em vez de cereal) e pela administração da usina de biogás, deve-se considerar também a elevada demanda de capital e a alocação de área. A construção de uma usina de biogás provoca uma imobilização de capital tão elevada quanto a da produção

leiteira. A terra e a alocação de área de que necessita o agricultor são calculadas com base no tamanho da usina de biogás e na demanda da cultura de gado (ver tabelas 9.1 e 9.2). Para efeito de cálculo, o valor de criação de gado leiteiro agrega, além da demanda de ração básica, também a área necessária para a ração concentrada.

Tabela 9.2: Terra exigida, imobilização de capital e tempo de trabalho necessário de diferentes atividades

	Cereais 65 dt/ha	Milho 400 dt/ha	153 VL (8000 l)	UBG 150 kW	UBG + 150 VL
Terra exigida [ha]	1	1	118 ha 0,77 ha/vaca	79	183 (67 ha UBG)
Imobilização de capital [€/ha]	876	2.748	4.660	6.126	5.106
Mão de obra exigida [homem- hora/ha]	9,3	15,5	65,6	31,1	66,7

UBG: Usina de biogás
VL: Vacas leiteiras

A partir da área de terra determinada, calculam-se a mão de obra exigida e a sua alocação nos diferentes prazos da geração de plantas destinada ao fornecimento de substrato. A alocação da mão de obra também ocorre nas atividades de operação de uma usina de biogás agrícola, com todas as suas variáveis como o tipo e a quantidade de substrato, as soluções técnicas e construtivas, e a forma como o negócio ou a atividade são integrados em uma empresa existente ou a ser criada.

Exemplo: com base no tempo de trabalho por unidade de área de terra, uma usina de biogás de 150 kW necessita de aprox. 50% do tempo de trabalho necessário para a criação de gado leiteiro em área equivalente (cf. figura 9.3). O tempo exigido de trabalho da usina de biogás resulta de aprox. 60% do cultivo de substratos e aprox. 40% da operação da usina de biogás. A combinação entre geração de biogás e criação de gado resulta em acentuados efeitos sinérgicos no que tange à economia, redução de emissões e até mesmo à administração da mão de obra. É importante que o tamanho da usina de biogás e, portanto, o tempo de trabalho exigido sejam adaptados às condições operacionais.

Nas condições encontradas comumente no Leste da Alemanha, em que a agricultura ocupa grandes áreas, provou-se útil que o responsável pela alimenta-

ção da unidade de gado leiteiro, p. ex., tire proveito do seu conhecimento de processos biológicos para supervisionar a usina de biogás.

O tempo de trabalho necessário para operar uma usina de biogás se desmembra principalmente nas seguintes importantes etapas do processo:

- Geração, colheita, armazenamento ou obtenção da matéria-prima (substratos)
- Operação da usina com preparação e carregamento de substrato
- Supervisão da usina com monitoramento de processos, manutenção, conservação e eliminação de falhas e danos, bem como tarefas administrativas
- Deposição de biofertilizantes

Embora todas as etapas do processo sejam necessárias para a operação da usina, a elas podem ser alocadas diferentes cargas de trabalho, conforme o modo de operação e o substrato. Em todo caso, a elaboração do horário de trabalho deve ser considerada no estágio preliminar de planejamento a fim de evitar surpresas desagradáveis. Afinal, existem também soluções alternativas testadas e comprovadas na prática. Por exemplo, atividades de cultivo de plantas, como colheita, transporte e deposição de biofertilizantes, também podem ser encarregados a terceiros. Até mesmo as atividades de manutenção e monitoramento (remoto), na operação da usina, podem ser terceirizadas a especialistas. Só é possível determinar a solução econômica e adequada para a empresa se for conduzido um cuidadoso planejamento de cada unidade produtiva.

9.1.3.1 Geração, colheita e armazenamento da matéria-prima

Se a produção de matéria-prima se realizar em áreas próprias de cultivo, por exemplo, com o plantio de milho para silagem, a colheita de cereais para silagem de planta inteira ou a colheita de pasto, estão à disposição dados de planejamento abrangentes sobre as técnicas de produção convencionais. Geralmente, eles podem ser utilizados para a obtenção de matéria-prima sem a necessidade de grandes ajustes. Por isso, o seguinte cálculo se baseia nos conhecidos materiais de cálculo da coleção de dados da KTBL "Planejamento operacional" [9-1].

Tempo de trabalho necessário para a geração de substratos para a usina-modelo III

Tomemos o modelo III para ilustrar e calcular os efeitos sobre a administração da mão de obra (ver também o capítulo 8). Essa usina-modelo processa esterco da criação de gado leiteiro com um rebanho de cerca

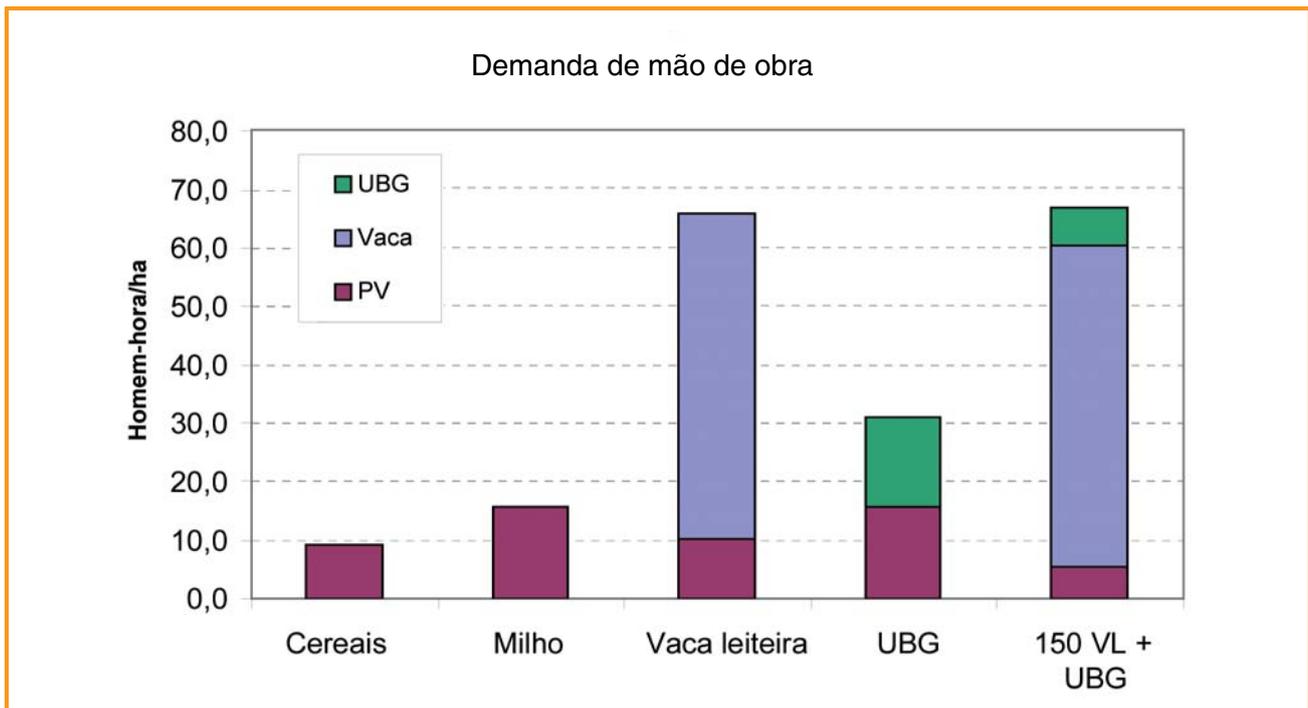


Figura 9.3: Trabalho específico exigido em diferentes atividades com integração da geração de biogás (UBG: usina de biogás, Vaca: criação de gado com vacas leiteiras (VL), PV: produção de vegetais)

de 150 UGM. São utilizadas 5.750 t de silagem de milho e 200 t de grãos de cereais como culturas energéticas. Assumindo-se produções de 44 t/ha de silagem de milho (50 t/ha de milho ensilado menos 12% de perdas na ensilagem) e 8 t/ha de grãos de cereais, é necessária uma área de aprox. 156 ha para o cultivo de plantas energéticas (131 ha de milho, 25 ha de cereais).

É secundário o fato de essas áreas serem da própria empresa ou arrendadas, ou disponibilizadas por permuta de áreas ou por cooperação em consórcio. Essas áreas não estão mais disponíveis para o fornecimento de ração básica. É necessário examinar se, no todo, a rotação de culturas permanece equilibrada.

Para a usina-modelo III, assumiu-se que um tamanho médio de parcela de 5 ha e uma distância de 2 km entre a lavoura e a usina sejam um ponto de partida adequado para uma boa produção. O maquinário próprio de colheita de silagem de milho é bastante restrito, pois na agricultura de pequena escala é preferível contratar uma empreiteira para realizar o trabalho mais exigente e caro. Na colheita de cereais, assume-se que a própria empresa realiza todos os trabalhos.

Com base nessas premissas, estima-se que sejam necessários ao todo 800 homens-hora por ano (não incluída a deposição de biofertilizantes).

As tabelas 9.3 e 9.4 a seguir exemplificam a expectativa da demanda de mão de obra. Os valores são

provenientes do banco de dados da KTBL, que oferece inúmeras formas de planejamento.

Durante o período de colheita da silagem de milho, em setembro e início de outubro, conforme o equipamento empregado são necessários 800 homens-hora no transporte do campo para o silo e no armazenamento com carregadeira.

Notável é o fato de que cada tonelada de substrato produzido com aproximadamente 0,27 homem-hora custa 4,00 €, incluindo o tempo necessário para a deposição dos biofertilizantes, utilizando-se uma remuneração de 15,00 € por hora.

A geração de silagem e cereais ocasiona em determinadas épocas do ano uma demanda de mão de obra, a qual, da mesma forma, teria de ser programada no caso de outras finalidades, tal como venda ou alimentação. Um aspecto em comum com esse processo de produção é que a utilização do produto armazenado por um longo período ocorre da mesma forma, geralmente durante o ano todo. Isso pode ser positivo para toda a execução do processo. Em todo caso, o carregamento dos substratos na usina de biogás se caracteriza por uma demanda de mão de obra de uniformidade comparável e com pequenas variações.

Mais difícil de planejar e prever é a exigência de mão de obra durante os tempos de vegetação, em que a ocorrência e o processamento se dão somente em de-

Tabela 9.3: Sequência de trabalho e tempo de trabalho exigido no processo de silagem do milho

Processo de trabalho: Silagem de milho	Homem-hora/ha
Cultivo	4,9
Colheita e transporte serviço prestado por empreiteira	0
Total homens-hora milho	4,9

Tabela 9.4: Sequência de trabalho e tempo de trabalho exigido no processo de cereais

Processo de trabalho: Cereais	Homem-hora/ha
Cultivo	5,07
Colheita e transporte	1,1
Total homens-hora cereais	6,17

terminados períodos. Alguns exemplos são o aproveitamento de folhagem verde ou de resíduos de hortaliças, que ocorrem somente em determinados períodos. Do ponto de vista da administração da mão de obra e dos processos, é sempre uma vantagem quando a utilização sazonal de substratos gerados pode recorrer a "substratos de reserva" armazenados para evitar suspensões momentâneas do fornecimento.

Também não se deve desprezar as influências negativas que o processo de digestão sofre pela forte variação da composição do substrato quando se utilizam, principalmente, substratos sazonais.

Essa questão é ainda mais importante quando os substratos não são gerados na própria empresa. Nesse caso, não se deve subestimar a mão de obra envolvida na aquisição, embora não se conheçam os seus valores exatos. O fornecimento o mais duradouro e contínuo possível é uma tarefa que depende, em última instância, da habilidade comercial do operador da usina. Se o substrato for transportado pelo operador da usina de biogás, a mão de obra necessária tem obviamente um impacto sobre a organização das operações e os custos envolvidos.

O transporte na empresa e entre empresas é algo inerente à atividade de agroempresas, principalmente no caso de usinas de biogás operadas em consórcio. Deve-se planejar não apenas a mão de obra extra, mas também os custos associados, que podem ter um peso decisivo. Com muita frequência se utilizam esterco líquido ou dejetos sólidos da criação de animais, ou resíduos do processamento de cereais, beterraba e hortifrutigranjeiros, entre outros produtos. É importante sempre observar a relação entre o "valor do produto"

para a geração de eletricidade e o "preço", inclusive o transporte.

Antes de firmar cooperações ou contratos de fornecimento, deve-se esclarecer antecipadamente a viabilidade do transporte. Isso vale especialmente para a definição do local da usina.

9.1.3.2 Tempo de trabalho necessário para a supervisão de uma usina de biogás

No âmbito do Programa de Medição de Biogás II, foi realizado, ao longo de dois anos, um amplo estudo que analisou diários operacionais de 61 usinas na Alemanha e coletou dados sobre a demanda de mão de obra [9-2]. A tabela 9.5 mostra a sistematização e análise das médias dos valores obtidos.

Nessa tabela, o valor médio da eliminação de falhas técnicas e biológicas em usinas de biogás é o resultado da análise dos dados de 31 usinas, no âmbito do projeto "Análise dos pontos críticos de usinas de biogás" [9-3].

A análise desses e de outros registros mostra que com o aumento da potência nominal da usina eleva-se também o tempo total de trabalho exigido, medido em homens-hora por semana (cf. figuras 9.4 e 9.5). Os resultados do Programa de Medição de Biogás II mostram também que há uma estreita relação entre o tamanho do rebanho, a quantidade carregada de substrato em t/semana e o tempo exigido de trabalho.

Infelizmente, os valores de tempo de trabalho não permitem inferir com segurança sobre áreas específicas das operações.

Deve-se atentar para o fato de o estudo [9-4] não incluir o tempo de trabalho para a eliminação de falhas, embora essa variável tenha sido abrangida pelas análises de [9-5] para o cálculo do tempo de trabalho da supervisão.

Além disso, nas fontes citadas as etapas de trabalho da supervisão não estão subdivididas com exatidão, impossibilitando que se comparem os dados. Por isso, não é possível saber com segurança que etapas de trabalho são ou não atribuídas à usina de biogás.

Os resultados da análise [9-5] basearam as considerações sobre a viabilidade econômica das usinas-modelo.

Tempo de trabalho necessário para a supervisão da usina-modelo III

Com base nos dados anteriores [9-5], a supervisão da usina de biogás com eliminação de falhas perfaz 4,5 horas por dia. Isso significa que para essa usina (350 kW_{el}) deve ser planejado 0,5 homem-dia para supervi-

Tabela 9.5: Tempo de trabalho necessário para a supervisão de usinas de biogás

Tipo de trabalho	Unidade	Média	Mín.	Máx.
Controle ^a	h/semana	4,4	0,0	20,0
Registro de dados ^a	h/semana	2,7	0,0	9,9
Manutenção ^a	h/semana	3,2	0,0	14,0
Eliminação de falhas ^b	h/semana	2,7	---	---
Total	h/semana	13,0		

a. Conforme [9-2], ajustado

b. [9-3]

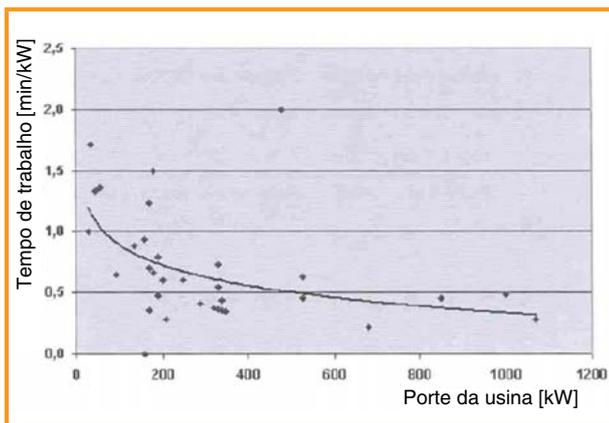


Figura 9.4: Tempo de trabalho necessário para a supervisão da usina [9-4]

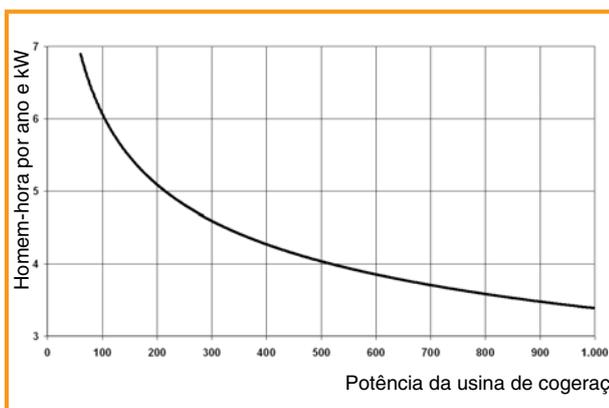


Figura 9.5: Tempo de trabalho necessário para a supervisão e manutenção da usina [9-5]

sioná-la e realizar trabalhos de rotina, registro de dados, trabalhos de controle e manutenção, e eliminação de falhas.

9.1.3.3 Tempo de trabalho necessário para o preparo do substrato e carregamento do biodigestor

As tarefas de atribuição de substrato, retirada dos depósitos e, em alguns casos, preparo devem ser coordenadas com outras atividades agrícolas, permitindo obter valores de referência que propiciam suficiente confiabilidade. No quadro geral, vale ressaltar que os custos da mão de obra nas operações de uma usina de biogás perfazem menos de 10% do total de custos, não tendo portanto um peso decisivo na rentabilidade do negócio. Mesmo assim, deve-se realizar o cálculo da rentabilidade nos casos em que gargalos na mão de obra disponível exigem a contratação da prestação de serviços externa. Observar que, no futuro, a maior exatidão do planejamento dependerá de valores de referência mais precisos.

O tempo de trabalho necessário para o preparo e carregamento do substrato no biodigestor depende muito do tipo de substrato.

Substratos líquidos como o esterco são geralmente armazenados no estábulo ou ao seu lado, transferidos para um reservatório de alimentação e dali bombeados para o interior do biodigestor por uma bomba temporizada (cf. capítulo 8.1 "Representação das usinas-modelo"). O tempo de trabalho necessário se limita a verificações e ajustes ocasionais e deve ser coberto pelos valores de referência de trabalhos de manutenção mencionados anteriormente.

O mesmo vale para bagaços líquidos e polpas oriundas da fabricação de vinho, aguardente e suco de frutas.

Gorduras e óleos líquidos são bombeados dos veículos de entrega para tanques ou fossas próprias. Também nesse caso o tempo de trabalho necessário se limita geralmente a verificações e ajustes.

No caso de **substratos sólidos**, a maior parte é de silagens de milho e gramíneas de origem agrícola. São utilizados também grãos e resíduos de cereais gerados durante as operações de limpeza e preparo dos grãos.

Tabela 9.6: Tempos de carregamento conforme o equipamento de carregamento utilizado (segundo [9-6], [9-7], [9-8])

Material carregado	Tempos de carregamento em [min/t]		
	Carregador frontal, trator	Carregadeira	Carregadeira telescópica
Silagem de milho (silo trincheira)	4,28...8,06	6,02	3,83
Silagem de gramíneas (silo trincheira)	4,19...6,20	4,63	3,89
Silagem de milho (silo trincheira), acesso de cascalho, inclinado	5,11	2,44	-
Silagem de gramíneas (silo trincheira), acesso de cascalho, inclinado	5,11	3,66	-
Dejetos sólidos (base para esterco)	2,58	2,03	-
Fardos (retangular)	1,25	-	1,34
Cereais (soltos)	2,61 ^a	-	1,50 ^a

a. Valores provisórios ajustados

O cultivo de raízes e tubérculos (beterraba, cebola, batatas) e as partes que sobram em seu processamento também podem ser aproveitados como substratos.

A maior parte do tempo de trabalho necessário é dedicada ao carregamento do reservatório de alimentação com substrato. Normalmente, são utilizados equipamentos móveis de carregamento e transporte para o enchimento dos diversos sistemas de alimentação do biodigestor (por reservatório de alimentação, tremonha de enchimento de transportador inclinado/equipamento hidráulico de injeção). O exemplo a seguir mostra os tempos básicos dos módulos que devem ser adotados no planejamento. No momento não estão disponíveis medições do tempo de trabalho específicas realizadas em usinas de biogás.

A tabela 9.6 contém o resumo dos tempos de carregamento de diferentes equipamentos.

O tempo de trabalho necessário para a alocação de substratos pode ser estimado pela multiplicação dos valores de referência dos tempos de carregamento pelas quantidades de substrato processadas anualmente, somado a um excedente para cobrir os tempos necessários de troca de ferramenta/preparação.

O tempo de trânsito entre a face da silagem e a usina de biogás pode aumentar sensivelmente o tempo de trabalho envolvido, particularmente nas usinas de biogás de maior porte. Isso pode ser evitado pela escolha de um local adequado para instalar a usina e pela opção por soluções técnicas adequadas.

Tempo de trabalho necessário para o preparo de substrato e carregamento do substrato na usina-modelo III

Assume-se que o enchimento do equipamento de alimentação de substrato se dá por carregadeiras teles-

cópicas. Considerou-se um tempo de preparação adicional de 15 minutos por dia para repor o combustível das máquinas, retirar a lona do silo e cobri-lo novamente. Assim, os tempos de trabalho para o preparo e carregamento do substrato totalizam 403 homens-hora/ano (ver tabela 9.7).

9.1.3.4 Tempo de trabalho necessário para a deposição de biofertilizantes

Na usina-modelo III, das cerca de 8.950 t anuais de substrato utilizado (esterco líquido e culturas energéticas), aproximadamente 71% da matéria orgânica seca são convertidos em biogás. A conversão reduz a massa de biofertilizantes, de forma que apenas aproximadamente 7.038 t da massa de substrato original têm de ser depositadas.

O tempo de trabalho exigido para a deposição das respectivas quantidades de esterco não é aqui considerado, pois a massa de esterco carregada na usina de biogás também geraria custos de deposição mesmo sem tratamento anaeróbico. Sob as mesmas condições de deposição e equipamento, o tempo de trabalho necessário é igualmente elevado.

Com um caminhão de bombeamento de esterco com reboque de mangueiras com capacidade de 12 m³ em parcelas de 5 ha, uma distância de 2 km entre o campo e a usina, e uma média de 20 m³ de biofertilizantes depositados por hectare, o tempo de trabalho é de 1,01 homem-hora/ha ou 3,03 minutos de trabalho/m³. A quantidade adicional de biofertilizantes de 4.038 t (7.038 t - 3.000 t esterco) resulta em uma carga de trabalho de 204 homens-hora/ano. Ao todo, deve-se planejar 355 homens-hora/ano para a deposição de biofertilizantes.

Tabela 9.7: Cálculo do tempo de trabalho necessário/ano para o preparo e carregamento do substrato (com tempo de troca de ferramenta/preparação) para a usina-modelo III

Substrato	Unidade	Silagem de milho	Cereais
Quantidade de substrato	t/ano	5750	200
x Tempo de carregamento	min/t	3,83	1,50
Tempo de trabalho para carregamento	Homem-hora/ano	368	5
+ Tempo de preparação	min/dia operacional	5	
x Dias operacionais	Dias operacionais/ano	365	
Tempo de trabalho preparação	Homem-hora/ano	30	
Total do tempo de trabalho necessário	Homem-hora/ano	403	

Tempo de trabalho necessário da usina-modelo III

Em resumo, para a **usina-modelo III**, assumindo que trabalhos intensivos de colheita são terceirizados, o tempo de trabalho anual necessário é de aproximadamente 3.126 homens-hora.

Exigindo cerca de 2.230 homens-hora, a supervisão da usina durante todo o ano, inclusive o carregamento de substrato, se caracteriza por uma rotina relativamente uniforme e repetitiva. Aproximadamente um empregado deve estar disponível continuamente para a tarefa.

O tempo de trabalho necessário para o cultivo de 131 ha de milho de silagem equivale a 641 homens-hora (inclusive deposição da respectiva quantidade de biofertilizantes), sendo que uma empreiteira se encarrega da colheita. Cerca de 490 homens-hora são necessários para o transporte, armazenamento e compactação da safra em um silo trincheira, que podem ser realizados pela própria empresa.

9.1.4 O fator tempo na tecnologia

O principal objetivo na operação de uma usina de biogás é utilizar a potência instalada para gerar eletricidade da melhor forma possível, sem que haja a necessidade, p. ex., de queimar o biogás excedente por meio de um *flare*.

Isso significa principalmente que o motor da usina de cogeração deve estar operando a carga elevada, de modo que deve funcionar o máximo número de horas por ano em carga plena, ou seja, na faixa de máxima eficiência. A potência instalada do motor, portanto, deve ser compatível com uma expectativa de produção de biogás realista.

No planejamento preliminar, tipicamente calculam-se 8.000 horas de funcionamento do motor a uma carga de 100%. Ocasionalmente, planejamentos com uma faixa de segurança mais folgada contra riscos

econômicos fixam esse valor em 7.000 horas por ano ("margem de segurança").

Uma carga de trabalho de 7.000 horas por ano, porém, significa que, para ser capaz de converter em energia o biogás gerado no processo de digestão, o motor tem de ser no mínimo 13% maior que aquele dimensionado para operar 8.000 horas por ano. Essa capacidade adicional, que deve estar presente nos demais equipamentos para transporte, armazenamento e tratamento de gás, tem um custo extra de 1.000 €/kW. Além do mais, precisa-se considerar que o motor não deve ser sobrecarregado em demasia com alternâncias de partida e parada no mesmo dia. Por essa razão e visando a um fornecimento de calor uniforme ao processo (aquecimento somente por um motor em funcionamento!), o trabalho do motor, que deve atingir 7.000 horas por ano em carga total, somente atinge esse nível se operar quase incessantemente em carga parcial (90% da potência nominal). A operação do motor em carga parcial significa quase sempre que ele sofre quedas em eficiência. Tais perdas de eficiência sempre se refletem em uma redução da quantidade de eletricidade produzida e, por conseguinte, na redução do faturamento da usina. O capítulo 8.3, "Análise de sensibilidade", contém um panorama detalhado das perdas econômicas devidas, p. ex., à redução da eficiência em 5%.

Do ponto de vista econômico, portanto, a meta deve ser que a usina de cogeração opere em carga total durante 8.000 por ano. É necessário observar, porém, que esse nível de carga do motor exige um volume de armazenamento de gás suficiente (> 7 h) e um hábil gerenciamento do armazenamento de gás. Em situação normal, o nível do gasômetro não deve ultrapassar 50% para:

- poder acomodar o volume de gás adicional durante a homogeneização

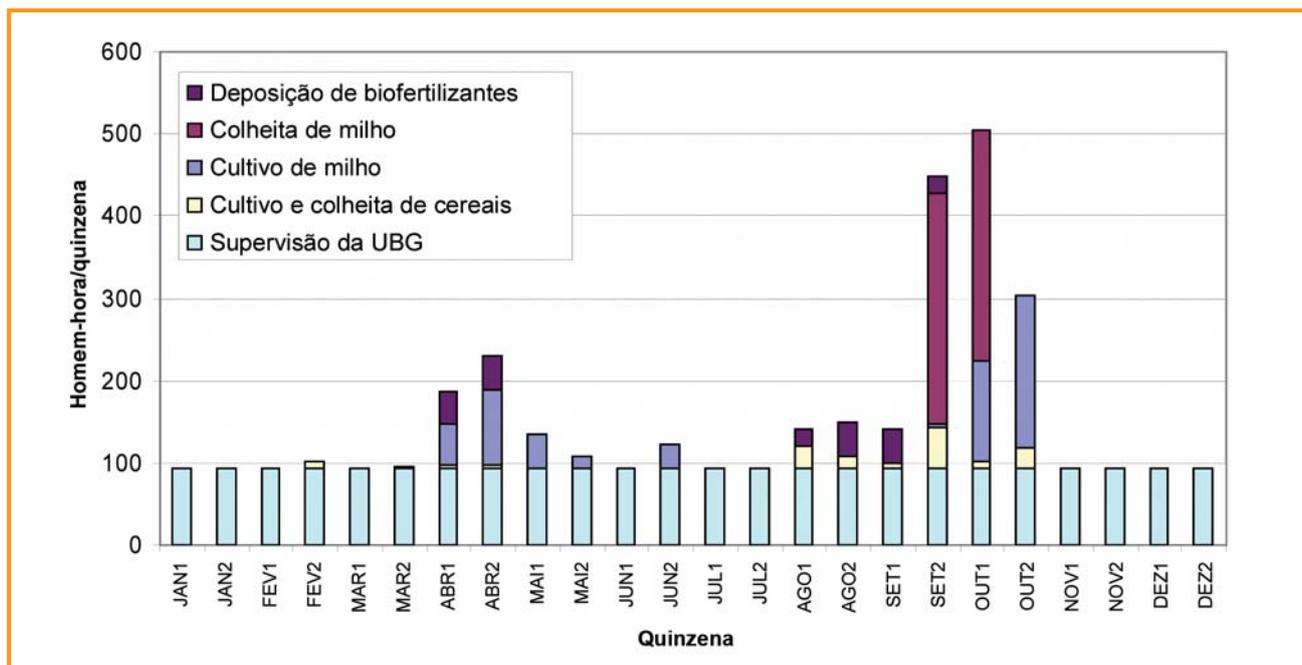


Figura 9.6: Tempo de trabalho necessário para a usina-modelo III.

- compensar o aumento de volume causado pela incidência de raios solares
- permitir armazenar o gás em caso de falhas na usina de cogeração ou paradas ocasionadas pela rede.

9.2 Fontes bibliográficas

- [9-1] Coleção de dados da KTBL "Planejamento operacional" (Betriebsplanung) 2008/2009
- [9-2] Weiland, P.; Gemmeke, B.; Rieger, C.; Schröder, J.; Plogsties, V.; Kissel, R.; Bachmaier, H.; Vogtherr, J.; Schumacher, B. FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Biogas-Messprogramm II, Gülzow (2006)
- [9-3] KTBL (2009): Schwachstellen an Biogasanlagen verstehen und vermeiden
- [9-4] Göbel, A. e Zörner, W. (2006): Feldstudie Biogasanlagen in Bayern
- [9-5] Mitterleitner Hans, LfL, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, 2003 (complementada) - Depoimento pessoal
- [9-6] Melchinger, T.: Ermittlung von Kalkulationsdaten im landwirtschaftlichen Güterumschlag für Front- und Teleskoplader. TCC, FH Nürtingen (2003)
- [9-7] Mayer, M.: Integration von Radladern in alternative Mechanisierungskonzepte für den Futterbaubetrieb. TCC, FH Nürtingen (1998)
- [9-8] Handke, B.: Vergleichende Untersuchungen an Hofladern. TCC, FH Nürtingen (2002)

Qualidade e Aproveitamento dos Biofertilizantes



10.1 Propriedades dos biofertilizantes

10.1.1 Propriedades, nutrientes e substâncias de enriquecimento

As propriedades dos biofertilizantes e suas substâncias são determinadas essencialmente pela matéria submetida à fermentação anaeróbia e pelo processo de fermentação em si. Usinas de biogás agrícolas processam principalmente esterco sólido e líquido de origem bovina e suína, e esterco oriundo da engorda de aves. Em função do seu alto teor de amônio e resíduos da adição de cálcio, os adubos orgânicos da criação de galinhas poedeiras têm utilização mais restrita. Graças às regras de remuneração da EEG, há poucos operadores de usinas que continuam utilizando exclusivamente culturas energéticas. Apesar disso, são dignos de menção os conhecidos e apreciados efeitos da digestão de adubos orgânicos sobre as propriedades do biofertilizante:

- Redução da emissão de maus odores por decomposição de compostos orgânicos voláteis
- Degradação profunda de ácidos orgânicos de cadeia curta, minimizando os riscos de queima de folhas
- Melhoramento das propriedades de escoamento, com conseqüente redução de impurezas nas folhas de forrageiras e menor esforço de homogeneização
- Melhoramento do efeito breve do nitrogênio pelo aumento do teor de nitrogênio de rápida ação
- Extermínio ou neutralização de sementes de ervas daninhas e germes patogênicos (humanos, zoonóticos e fitopatogênicos)

Como a digestão provoca a alteração principalmente da fração de carbono do substrato, os nutrientes contidos são preservados integralmente. O processo de digestão anaeróbia torna-os mais solúveis e portanto aumenta a sua fitodisponibilidade [10-1].

Se na geração do biogás forem usadas principalmente culturas energéticas, os processos biológicos com substratos ou rações semelhantes são comparáveis àqueles do trato digestivo de animais de interesse comercial. Por isso, obrigatoriamente deve-se originar biofertilizantes com propriedades equivalentes às de adubos orgânicos. Essa tese é confirmada por estudos do LTZ Augustenberg (Centro Tecnológico-Agrícola), que analisou biofertilizantes de usinas no Estado de Baden-Württemberg quanto ao teor e qualidade de nutrientes, substâncias de enriquecimento e efeito da adubação. A tabela 10.1 mostra os valores característicos dos biofertilizantes [10-2]. Foram analisados biofertilizantes do esterco líquido bovino + culturas energéticas, esterco líquido suíno + culturas energéticas, culturas energéticas em predominância e de resíduos (em parte misturados com culturas energéticas). Para apoiar os resultados, foram analisadas amostras de esterco não tratado.

As conclusões mais importantes do estudo são:

- Os teores de matéria seca dos biofertilizantes (em média 7% da MF) são aproximadamente 2% inferiores aos do esterco líquido bruto.
- Os teores totais de nitrogênio dos biofertilizantes de 4,6 a 4,8 kg/t MF são um pouco superiores aos do esterco líquido bovino.
- A relação C/N dos biofertilizantes é de 5 a 6, sendo portanto significativamente inferior ao do esterco líquido bruto (C/N:10)
- A degradação da matéria orgânica ocasiona a conversão do nitrogênio fixado em orgânico a anorgânico, aumentando portanto a fração de amônio (aprox. 60% a 70%) no nitrogênio total da biomassa fermentada.
- Os biofertilizantes misturados aos restos de resíduos orgânicos e de esterco líquido suíno tendem a ter altos teores de fósforo e nitrogênio amoniacal. Por outro lado, possuem teores mais baixos de MS e potássio e matéria orgânica que biofertilizantes de

Tabela 10.1: Comparação dos valores característicos e propriedades de enriquecimento de biofertilizantes e adubo orgânico [10-2]

Parâmetro	Unidade ou denominação	Esterco líquido bruto Esterco líquido bovino em maior parte	Biofertilizantes			
			Esterco líquido bovino e culturas energéticas	Esterco líquido suíno e culturas energéticas	Culturas energéticas	Resíduos (e culturas energéticas)
Matéria seca	% MF	9,1	7,3	5,6	7,0	6,1
Grau de acidez	pH	7,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Relação carbono/nitrogênio	C/N	10,8	6,8	5,1	6,4	5,2
Substâncias de ação alcalina	SAA (kg CaO/t MF)	2,9	-	-	3,7	3,5
kg/t MF						
Nitrogênio	N _{total}	4,1	4,6	4,6	4,7	4,8
Nitrogênio amoniacal	NH ₄ -N	1,8	2,6	3,1	2,7	2,9
Fósforo	P ₂ O ₅	1,9	2,5	3,5	1,8	1,8
Potássio	K ₂ O	4,1	5,3	4,2	5,0	3,9
Magnésio	MgO	1,02	0,91	0,82	0,84	0,7
Cálcio	CaO	2,3	2,2	1,6	2,1	2,1
Enxofre	S	0,41	0,35	0,29	0,33	0,32
Matéria orgânica	MO	74,3	53,3	41,4	51,0	42,0

MF: Matéria fresca

esterco líquido bovino ou culturas energéticas e suas misturas.

- Em relação aos nutrientes magnésio, cálcio e enxofre, não são constatadas diferenças significativas.

10.1.2 Poluentes

A concentração de poluentes no biofertilizante depende principalmente do substrato utilizado. Os valores de referência para teores de metais pesados em biofertilizantes, comparativamente a adubos orgânicos, se encontram na tabela 10.2. O processo de formação do biogás não altera as quantidades absolutas de metais pesados. Em relação à MS, em virtude da degradação da matéria orgânica, os teores de metais pesados se elevam após a digestão. Os níveis dos metais pesados chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) e mercúrio (Hg) atingem no máximo 17% dos valores máximos (FLMP = fração do limite permitido) permitidos pelo BioAbfV [10-23], e o cobre (Cu) e zinco (Zn) atingem respectivamente no máximo 70% e 80%. No geral, os teores de metais pesados são similares aos do esterco líquido bovino. O esterco líquido suíno tem concentrações de chumbo, cádmio, cobre e zinco significativamente mais altas. Embora o cobre e o zinco façam parte do grupo dos metais pesados, são

também micronutrientes essenciais na alimentação dos animais e plantas e nos processos microbiológicos em usinas de biogás. Eles são adicionados tanto na alimentação animal quanto em usinas que utilizam culturas energéticas. Por essa razão, o regulamento de adubos não define valores-limite para o cobre e o zinco. Nas dadas concentrações, não são esperadas contaminações do solo e das águas pela utilização de biofertilizantes.

10.1.3 Propriedades sanitárias

Os dejetos líquidos e outros resíduos orgânicos podem conter uma série de agentes infecciosos ao homem e animais (tabela 10.3).

Exames em série continuam a acusar a presença de salmonelas (tabela 10.4). A proporção de resultados positivos para a salmonela situa-se abaixo de 5%. No entanto, mesmo rebanhos clinicamente saudáveis são acometidos. Para quebrar o ciclo da infecção, portanto, é recomendável a higienização também de biofertilizantes produzidos exclusivamente de adubos orgânicos de origem animal, principalmente se forem distribuídos no mercado. Em muitos casos, porém, a lei permite que a parte de adubos orgânicos de uma usina de biogás não seja higienizada (cf. capítulo

Tabela 10.2: Comparação das concentrações de metais pesados de biofertilizantes e adubos orgânicos

	Biofertilizantes	FLMP dos valores declarados conforme a DüMV	FLMP dos valores-limite conforme a DüMV	Porcentagem dos valores-limite conforme o BioAbfV	Esterco líquido bovino	Esterco líquido suíno
	mg/kg MS	%	%	%	mg/kg MS	mg/kg MS
Pb	2,9	2,9	1,9	< 5	3,2	4,8
Cd	0,26	26	17,3	17	0,3	0,5
Cr	9,0	3	- ^a	9	5,3	6,9
Ni	7,5	18,8	9,4	15	6,1	8,1
Cu	69	14 ^c (35)	- ^b	70	37	184
Zn	316	31 ^c (158)	- ^b	80	161	647
Hg	0,03	6	3,0	< 5	-	-
Fonte	[10-2]	[10-19]	[10-19]	[10-23]	[10-3]	[10-3]

a. valor-limite só para Cr(VI)

b. DüMV não contém nenhum valor-limite

c. Valor declarado para adubos orgânicos

MS: Matéria seca

Tabela 10.3: Patógenos nos dejetos líquidos e resíduos orgânicos [10-4]

Bactérias	Vírus	Parasitas
salmonela (ELB, ELS, EG)	Patógeno da febre aftosa	Ascaridia sp.
Escherichia coli (ELB)	Febre suína	Estrôngilo
B. anthracis/carbúnculo (ELB)	Estomatite vesicular suína	Tremátodes
Brucellas (ELB, ELS)	Gripe suína	Fasciola hepatica
Leptospirose (ELB, ELS)	Gastroenterite transmissível (TGE)	Vermes dos pulmões
Micobactérias (ELB, ELS, EG)	Infecções por rotavírus	Vermes gastrointestinais
Erisipela suína (ELS)	Doença de Teschen	
Clostrídios (EG)	Doença de Aujeszky	
Estreptococos	Doença de Newcastle	
Enterobacter	Língua azul	
	Retro/parvo/echo/enterovírus	

ELB: esterco líquido bovino; ELS: esterco líquido suíno; EG: esterco de galinha

Tabela 10.4: Ocorrência de salmonelas em substratos e biofertilizantes de usinas de biogás

	Esterco líquido bruto			Biofertilizantes	
	Esterco líquido bovino, esterco líquido suíno, clinicamente saudáveis		Predomínio Esterco líquido bovino	Estercos líquidos e Culturas energéticas	Resíduos orgânicos e Culturas energéticas
Número de amostras	280	132	51	190	18
das quais salmonelas positivas	7	5	0	6	2
em %	2,5	3,8	0	3,2	11,1
Ano da amostragem	1989	1990		2005 a 2008	
Fonte	[10-5]	[10-5]	[10-2]	[10-2]	[10-2]

10.3.5). O resultado da análise de resíduos orgânicos, utilizado em usinas como substrato, mostra que nem sempre são cumpridas as rígidas normas de higienização para os outros cossustratos de origem animal e os resíduos de latas de lixo orgânico.

Na área fitossanitária, é importante prevenir principalmente os chamados organismos de quarentena, por meio de medidas de higienização. Particular importância têm as doenças das batatas e beterrabas (*Clavibacter michiganensis*, *Synchytrium endobioticum*, *Rhizoctonia solani*, *Polymyxa betae* e *Plasmodiophora brassicae*). Por isso, antes de serem utilizados em usinas de biogás, os efluentes e resíduos da indústria alimentícia devem sempre ser submetidos à higienização [10-6].

Em uma triagem realizada pelo LTZ, o Centro Tecnológico-Agrícola Augustenberg, foram examinados quase 200 esterco líquido e biofertilizantes para detectar a presença dos fitopatógenos fúngicos *Helminthosporium*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Phytophthora intermedium* e *Fusarium oxysporum*, os quais atacam também o milho e os cereais. Somente em um caso foi possível detectar um patógeno [10-2].

O exame em série também comprovou que o indicador "número de plantas e partes de plantas com capacidade de germinar/brotar", importante para avaliar o grau fitossanitário, foi geralmente cumprido na prática pelas usinas analisadas [10-2].

10.2 Armazenamento dos biofertilizantes

O pré-requisito para a utilização dos nutrientes e substâncias de valor contidas nos biofertilizantes é que sejam armazenados adequadamente em reservatórios. No armazenamento de biofertilizantes, tal como o de adubos orgânicos não tratados, ocorre a emissão de gases de importância climática, tais como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), bem como emissões de amônia (NH₃) e odores.

10.2.1 Emissões de amônia

O teor de amônio, elevado pelo processo de digestão, e o valor do pH nos biofertilizantes (cf. tabela 10.1) favorecem as emissões de amônia durante o armazenamento. Normalmente, a formação de sobrenadante é possível apenas até certo ponto. Para evitar as perdas de amônia em reservatórios abertos para o armazenamento de biofertilizantes, é altamente recomendável o uso de uma cobertura, p. ex., com palha picada, também em função das emissões de odores associados à amônia (tabela 10.5).

Tabela 10.5: Coberturas para depósitos de biofertilizantes para a redução de emissões de amônia^a [10-7]

Materiais de cobertura	Investimentos (Ø 15 m) €/m ²	Vida útil Anos	Custos anuais €/m ²	Redução de emissões em comparação com reservatórios não cobertos %	Observação
Sobrenadante natural	-	-	-	20-70 ^b	Baixa eficácia com deposição frequente de biofertilizantes
Palha picada	-	0,5	< 1	70-90	Baixa eficácia com deposição frequente de biofertilizantes
Granulado	11	10	2,5	80-90	Necessário repor material perdido
Corpo flutuante	35	20	3,2	90-98 ^c	Longa vida útil, novidade, pouca experiência
Lona flutuante	38	10	5,3	80-90	Exige pouca manutenção; custo elevado inviabiliza uso em grandes reservatórios
Teto de lona	50	15	5,3	85-95	Exige pouca manutenção, não permite entrada da água de chuva
Teto de concreto transitável	85	30	6,2	85-95	Baixo custo, não permite entrada da água de chuva, até 12 m de diâmetro

a. Até o momento, existem poucos estudos dedicados à redução de emissões em usinas em funcionamento. Os valores são derivados de estudos e experiência com o esterco líquido suíno.

b. Conforme as características do sobrenadante

c. Não indicado para biofertilizantes viscosos

Pressupostos: taxa de juros: 6%; reparos: 1% (só com lona flutuante, teto de lona e teto de concreto); granulado: 10% perdas anuais com granulado; custos da palha: 8 €/dt de palha (compressão, carregamento, transporte, picagem, espalhamento), quantidade utilizada: 6 kg/m²

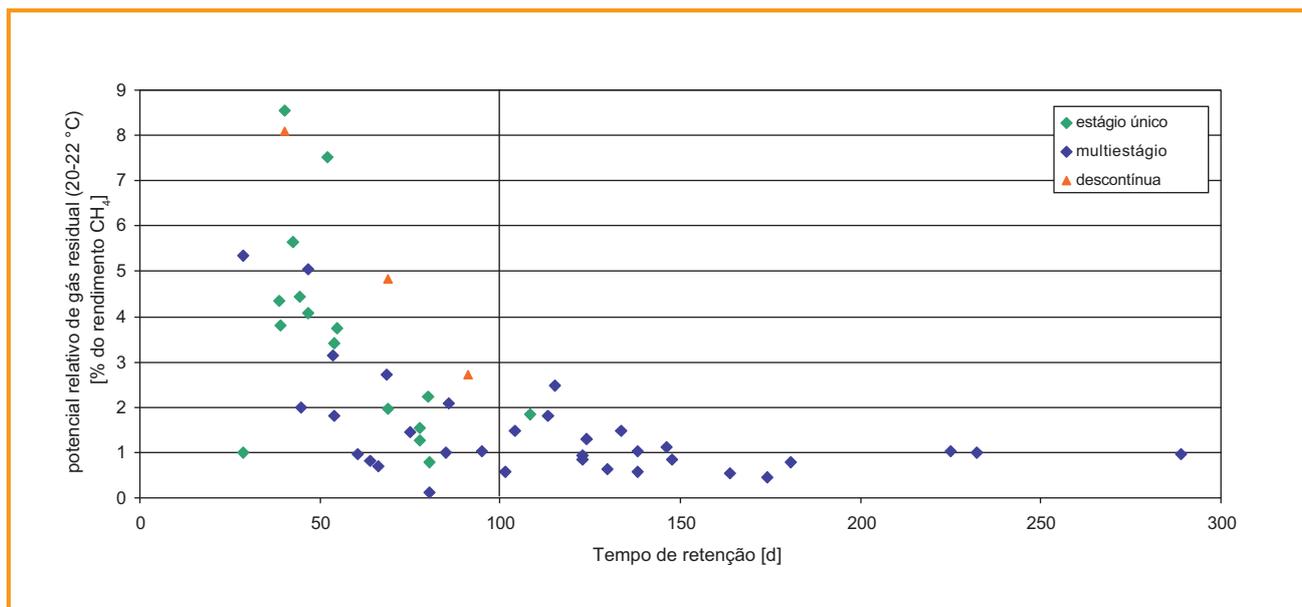


Figura 10.1: Correlação entre o potencial relativo de gás residual a 20 – 22 °C e o tempo de retenção hidráulica [10-8]

10.2.2 Emissões relevantes ao clima

A metanogênese do esterco fermentado, pelo processo anaeróbico, é dramaticamente reduzida em comparação ao esterco não tratado, uma vez que no biodigestor uma parte da matéria orgânica já foi metabolizada no substrato, reduzindo sensivelmente a disponibilidade do carbono de fácil degradação. O grau de redução das emissões de metano depende sobretudo da taxa de degradação da matéria orgânica e, simultaneamente, do tempo de retenção do substrato no biodigestor. Assim, diversos estudos mostraram que biofertilizantes com fase de fermentação curta, ou seja, menor tempo de retenção no digestor, emitem mais CH_4 que resíduos com longo tempo de retenção no digestor (figura 10.1).

Em comparação com o esterco não tratado, breves tempos de retenção podem levar ao aumento das emissões de metano caso o substrato, que acaba de ser inoculado com microrganismos metanogênicos, seja retirado do biodigestor após breve período e encaminhado para o depósito de biofertilizantes [10-9]. Deve-se, portanto, evitar curtos-circuitos.

Para estimar as emissões de metano a partir dos biofertilizantes, podem ser adotados os resultados de ensaios de fermentação com biofertilizantes em batelada a 20 – 22 °C [10-8], pois correspondem aproximadamente às condições de temperatura no reservatório de biofertilizantes sob condições observadas na prática. Por outro lado, valores do potencial de gás residual determinados sob condições mesofílicas (37 °C)

não são representativos para inferir sobre os valores efetivos das emissões. Mesmo assim, eles podem ser um indicativo da eficácia do processo de fermentação, uma vez que refletem o potencial de biomassa não convertido no biodigestor e ainda não presente no biofertilizante. Ambos os parâmetros são, porém, dependentes da forma como se dá o processo e dos substratos adotados em cada uma das usinas. Assim, os valores indicados na tabela 10.6 servem apenas como referência.

Tabela 10.6: Potencial de gás residual de biofertilizantes de usinas de biogás agrícolas, com base no rendimento de metano por t de substrato carregado; valores médios, mínimos e máximos obtidos de 64 usinas de biogás (Programa de Medição de Biogás II) [10-8]

Temperatura do processo		Potencial de gás residual [% do rendimento de CH_4]	
		um estágio	multiestágio
20–22 °C	Média	3,7	1,4
	Mín. – máx.	0,8-9,2	0,1- 5,4
37 °C	Média	10,1	5,0
	Mín. – máx.	2,9-22,6	1,1-15,0

Em usinas multiestágio registra-se a tendência de um potencial de gás residual menor, tanto na faixa de 20 – 22 °C como a 37 °C (tabela 10.6). Isso se explica principalmente pelo tempo de retenção mais longo, típico da operação multiestágio, que tem o

efeito de reduzir o potencial de gás residual (figura 10.1).

Em função do elevado potencial de aquecimento global do CH_4 (1 g CH_4 corresponde a 23 g CO_2), deve-se centrar no objetivo de reduzir ou evitar as emissões de CH_4 dos reservatórios de biofertilizantes. Usinas que não sejam equipadas com um reservatório final impermeável a gases devem, além de dispor de modo multiestágio (biodigestores em cascata), cumprir no mínimo um dos seguintes requisitos:

- tempo de retenção hidráulica médio do volume total de substrato utilizado de no mínimo **100 dias** a uma temperatura de fermentação constante, ao longo do ano, de no mínimo **30 °C ou**
- Carga orgânica volumétrica **< 2,5 kg MOS/m³ · d**.¹

O cálculo do volume de substrato deve considerar todos os carregamentos no(s) biodigestor(es) (portanto, também a água e/ou material recirculado, p. ex.). O não cumprimento dos requisitos citados resulta em emissões de metano acima dos valores médios indicados na tabela 10.6. Nesse caso, recomenda-se que o(s) depósito(s) de biofertilizantes² receba(m) posteriormente uma cobertura impermeável a gases, no mínimo pelos primeiros 60 dias do tempo necessário do depósito de resíduos.

Conforme a EEG 2009, a cobertura do depósito de biofertilizantes é um pré-requisito para o pagamento do bônus NawaRo nos casos em que a usina esteja sujeita a uma licença conforme a Lei Alemã de Energias Renováveis. Essas são as usinas com potência total de combustão de 1 MW (cerca de 380 kW_{el}), ou cuja capacidade do tanque de esterco ultrapasse 2.500 m³. Em novas usinas isso é válido sem restrições. Para usinas antigas, ainda se discute a interpretação da lei, pois em muitos casos a modernização do reservatório de biofertilizantes é restrita ou até mesmo impossível (ver explicação anterior).

Para usinas novas a serem licenciadas conforme a legislação de construção, uma cobertura impermeável não é positiva apenas do ponto de vista ecológico, mas também do econômico. Afinal, o potencial de biomassa não aproveitado representa uma fonte de receita não explorada, particularmente no caso de grandes potenciais de gás residual. O gás residual obtido adicionalmente pode:

- ser utilizado também para a conversão em energia elétrica (aumento do trabalho elétrico). O seu pro-

cessamento representaria uma receita de eletricidade extra.

- ser aproveitado sem alterar a carga do motor. A quantidade de substrato correspondente ao gás adicional é economizada na entrada do sistema (opção de curto prazo em caso de carga plena da usina de cogeração; possibilita aumentar a receita pela eletricidade adicional injetada).

O retrofit do reservatório de biofertilizantes com uma cobertura impermeável a gases é uma opção vantajosa principalmente para as usinas que utilizam predominantemente culturas energéticas (p. ex. > 50% da matéria fresca introduzida). Nesse caso, em função do menor volume de resíduo a ser coberto e, portanto, do menor investimento, as vantagens econômicas já se fazem sentir mesmo a baixos rendimentos de gás residual (tabela 10.7). No caso de usinas que operam exclusivamente ou predominantemente à base de adubo orgânico, o volume de biofertilizante a cobrir aumenta quanto maior for a usina. Sob certas circunstâncias, a receita adicional da eletricidade injetada pode não ser suficiente para compensar os custos da cobertura impermeável. É certo que maiores receitas são proporcionadas pelo bônus de esterco líquido, lançado com a alteração da EEG de 2009 e voltado para usinas com um percentual de uso de esterco acima de 30% do total de matéria fresca, de modo que, com uma potência instalada bem inferior, o ponto de equilíbrio econômico é mais facilmente atingido que em usinas que utilizam uma percentagem menor de esterco. No entanto, geralmente é obtido um potencial de gás residual significativamente menor que em usinas baseadas em culturas energéticas.

Realizada pela KTBL em 2006, uma triagem demonstrou que somente aprox. 25% dos reservatórios circulares na época em operação (95% dos depósitos de biofertilizantes avaliados) eram cobertos com estruturas impermeáveis a gases [10-11]. Isso coincide com os resultados do Programa de Medição de Biogás II (FNR 2009). Nem todos os depósitos de biofertilizantes, porém, podem ser atualizados com uma cobertura impermeável. O grupo de especialistas que acompanhou a triagem chegou à conclusão que a modernização é possível sem contratempos apenas para 25% dos reservatórios circulares abertos. Outros 25% poderiam ser modernizados apenas com muito custo em função da arquitetura ou das limitações estáticas. A metade dos reservatórios circulares, assim como as

1. m³_d: Soma dos volumes úteis de digestão.

2. Os depósitos de biofertilizantes têm de satisfazer aos seguintes requisitos: a) não é permitido instalar um controle ativo de temperatura e b) o reservatório deve estar conectado a um sistema de condução de gases. Uma forma segura de evitar as emissões de CH_4 dos biofertilizantes é cobri-los nos primeiros 60 dias do tempo necessário para o depósito da biomassa fermentada, uma vez que, sob as condições encontradas na prática, a formação de metano é concluída nesse período.

Tabela 10.7: Pontos de equilíbrio econômico^a de reservatórios circulares de biofertilizantes modernizados com cobertura impermeável: Potência elétrica mínima instalada em que, para investimentos em modernização diferentes, atinge-se no mínimo uma cobertura dos custos [10-10; ajust.].^b

Fração de esterco líquido no substrato carregado	< 30 % (= remuneração sem bônus de esterco líquido)		> 30 % (= remuneração com bônus de esterco líquido)	
	3 %	5 %	3 %	5 %
Gás residual utilizável	Potência elétrica mínima ^b [kW]			
Investimento (número de reservatórios e diâmetro)				
33.000 € (p. ex. 1/ < 25 m)	138	83	109	66
53.000 € (p. ex. 1/ > 25 m)	234	133	181	105
66.000 € (p. ex. 2/ < 25 m)	298	167	241	131
106.000 € (p. ex. 2/ > 25 m)	497	287	426	231
159.000 € (p. ex. 3/ > 25 m)	869	446	751	378

a. Determinação do ponto de equilíbrio econômico com base na diferença entre os custos unitários (custo anual do quilowatt-hora adicional) e a taxa efetiva de remuneração por quilowatt-hora injetado.

b. Base de cálculo: usina de cogeração 8.000 horas em plena carga, custos proporcionais para a ampliação da usina de cogeração conforme potência adicional pela utilização do gás residual, eficiência conforme a ASUE (2005) [10-13], remuneração conforme a calculadora de remuneração online da KTBL (2009). Investimentos e custos anuais da cobertura calculados com base na vida útil de 10 anos, cobertura impermeável a gases nos primeiros 60 dias de duração do reservatório de biofertilizantes (conforme observado na prática, dentro desse período a formação de metano a partir do resíduo se encerra).

lagoas (cerca de 5% dos reservatórios de biofertilizantes), foi classificada como não passível de ser modernizada [10-11].

No caso de a aptidão à modernização ser restrita, deve-se contar com custos mais elevados que os valores anteriormente citados. Alternativamente, em usinas de um estágio pode-se estudar a viabilidade da construção de mais um biodigestor, pois nesses casos há um potencial de metano residual elevado, principalmente em tempos de retenção curtos, o que se traduz em receitas adicionais.

O óxido nitroso se origina durante a nitrificação do amônio ou a desnitrificação do nitrato. Como em esterco ou biofertilizantes armazenados em atmosfera estritamente anaeróbia só há a presença de amônio e não ocorre a nitrificação, a formação de óxido nitroso se limita à camada sobrenadante, dependendo do seu tipo e aeração. Isso se evidencia também em estudos de emissões de óxido nitroso de esterco e biofertilizantes, os quais levam em parte a resultados bem distintos quanto à influência da fermentação nas emissões de óxido nitroso. Via de regra, as emissões de N₂O de tanques de esterco são desprezíveis quando comparadas às emissões de CH₄ e NH₃, não tendo influência sobre o balanço de gases do efeito estufa [10-11]. A instalação de uma cobertura impermeável a gases permite evitar totalmente essas emissões.

10.3 Utilização dos biofertilizantes em áreas agrícolas

O fornecimento suficiente de matéria orgânica à fauna edáfica e o atendimento da demanda de nutrientes das plantas e do tipo de solo são pré-requisitos fundamentais da gestão sustentável de solos agrícolas.

Com os aumentos do preço de adubos minerais registrados nos últimos anos, o transporte e a deposição de biofertilizantes e adubos orgânicos finalmente se tornaram viáveis economicamente. Assim, normalmente o transporte dos biofertilizantes é compensador em função do seu valor nutritivo. Além disso, estratégias de adubação com biofertilizantes e adubos orgânicos têm um balanço energético mais favorável que estratégias baseadas exclusivamente na adubação mineral [10-12].

10.3.1 Disponibilidade e efeito nutritivo do nitrogênio

Valores analíticos (cf. tabela 10.1) comprovam que a digestão provoca a redução do teor de MS dos substratos. Além disso, a relação C/N no biofertilizante se torna menor em função da fermentação metanogênica, conforme o grau da digestão. Isso é favorável à adubação, uma vez que aumenta a fração de amônio disponível às plantas. A relação C/N se reduz de cerca de 10:1 para cerca de 5 a 6:1 no esterco líquido, e de 15:1 para 7:1 no esterco sólido. Com isso, uma parte da matéria orgânica mineralizável já se encontra de-

gradada. Isso significa que apenas 5% do nitrogênio fixado na matéria orgânica se encontra fitodisponível no ano de aplicação (ou 3% nos anos seguintes) [10-12].

A estimativa do nitrogênio disponível a partir do biofertilizante utilizado no ano de aplicação pode ser calculada por meio de equivalentes de adubação mineral (EAM). O EAM é determinado no ano de aplicação principalmente com base na disponibilidade do nitrogênio amoniacal. Nos anos seguintes, são fornecidas somente pequenas quantidades de nitrogênio do biofertilizante. Se a maior parte das perdas de amônia for evitada, o "EAM de curto prazo" será de 40% a 60%. Essa fração deve ser deduzida da demanda de adubo mineral. No caso da aplicação de biofertilizantes no longo prazo (10 – 15 anos), pode-se adotar um EAM de 60% a 70% [10-12], [10-7].

No geral, porém, pode-se assumir que a eficácia do nitrogênio dos biofertilizantes depende fundamentalmente do tipo e momento da deposição, das condições climáticas, do tipo de solo e da espécie cultivada.

Os valores de pH dos biofertilizantes, mais elevados que os do esterco líquido bovino bruto, têm efeito desprezível nas perdas de amônia, uma vez que, imediatamente após a deposição dos esterco líquido bovinos brutos, o pH atinge valores entre 8 e 8,5. As emissões de amônia, portanto, não se distinguem significativamente [10-15].

Tabela 10.8: Perdas cumulativas de amônia após a deposição de adubos orgânicos com espalhadores, sem incorporação ao solo, em diferentes temperaturas, dentro de 48 horas [10-7, ajustados]

Adubos orgânicos	Perdas de amônia em % do nitrogênio amoniacal aplicado ^a			
	5 °C	10 °C	15 °C	25 °C, sobre palha
Esterco líquido bovino, biofertilizantes viscosos ^b	30	40	50	90
Esterco líquido suíno, biofertilizantes não viscosos ^b	10	20	25	70
Adubo líquido	20			
Cama sobreposta e esterco amontoado			90	
Esterco seco de aves	90			

a. Emissão de NH₄-N remanescente após armazenamento.

b. Valores de biofertilizantes estimados como esterco líquido bovino e suíno, pois não há estudos empíricos disponíveis.

10.3.2 Medidas para reduzir as perdas de amônia após a deposição de biofertilizantes

10.3.2.1 Emissões de amônia

A tabela 10.8 apresenta um resumo das perdas de amônia após a deposição de adubos orgânicos em diferentes condições de temperatura. Pode-se ver claramente a relação inversa entre a temperatura e o teor de amônia. São esperadas perdas especialmente grandes quando biofertilizantes são depositados sobre plantas ou resíduos de plantas a elevadas temperaturas. As perdas são menores no caso da deposição a baixas temperaturas de biofertilizantes pouco viscosos, que percolam rapidamente através do solo. Uma significativa redução das perdas de amônia pode ser conseguida apenas pela escolha do momento ideal do lançamento do biofertilizante.

10.3.2.2 Técnicas e equipamentos de deposição

A deposição de biofertilizantes em áreas agrícolas serve-se de diferentes técnicas e equipamentos, utilizados também no aproveitamento de adubos orgânicos líquidos. A deposição se dá por meio de tanques móveis de esterco líquido, geralmente com equipamentos que reduzem as emissões (p. ex. reboque de mangueiras) e que permitem também a adubação de plantios em épocas de maior demanda de nutrientes.

O objetivo da deposição de biofertilizantes é aplicar os nutrientes neles contidos com precisão comparável àquela obtida na aplicação de adubos minerais, fornecendo o máximo de nutrientes às raízes das plantas e evitando suas perdas.

Na deposição de biofertilizantes, são utilizados os seguintes equipamentos:

Distribuidor de esterco

Distinguem-se dois tipos:

- Distribuidor de esterco com compressor
- Distribuidor de esterco com bomba

Os seguintes equipamentos permitem a distribuição dos biofertilizantes com precisão e poucas perdas:

Distribuidor com reboque de mangueiras

Distribuidores com reboque de mangueiras possuem uma largura útil de 6 a 24 m, com alguns modelos mais modernos chegando a atingir 36 m. As mangueiras de saída se encontram alinhadas a uma distância de 20 a 40 cm entre si. O biofertilizante é depositado sobre o solo em faixas de 5 a 10 cm de largura.

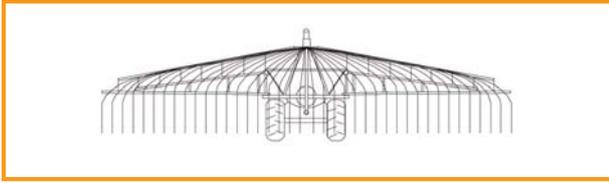


Figura 10.2: Distribuidor com reboque de mangueiras

Distribuidor com reboque de sapatos

Distribuidores com reboque de sapatos têm uma largura útil de 3 a 12 m, chegando às vezes até a 18 m. As mangueiras de saída são posicionadas com um espaçamento de 20 a 30 cm. Na extremidade da mangueira se encontra um aparato especial, normalmente em forma de sapato, pelo qual é descarregado o biofertilizante.

O distribuidor é rebocado pelo plantio (caso existe) ao longo da operação de deposição. Conforme o modelo, durante a aplicação a planta é deslocada para o lado. O biofertilizante é depositado de 0 a 3 cm do solo, de forma que geralmente a aplicação não suja o plantio.

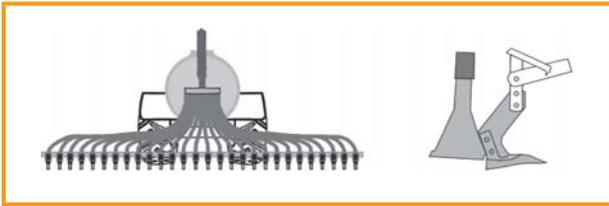


Figura 10.3: Distribuidor com reboque de sapatos

Distribuidor de sulcos

Tipicamente, o distribuidor de sulcos tem uma largura útil de 6 a 9 m e é dotado de mangueiras de descarga espaçadas com 20 a 30 cm. A aplicação se dá mediante uma estrutura em cuja extremidade se encontra um disco cortante (ou faca de aço), que realiza um sulco no solo, no qual o biofertilizante é aplicado.



Figura 10.4: Distribuidor de sulcos

Aplicação direta com cultivador

Os cultivadores de distribuição de esterco têm uma largura útil de 3 a 6 m e são dotados de mangueiras de

descarga espaçadas com 20 a 40 cm. O solo é preparado com as hastes do cultivador e por sua extremidade o biofertilizante é depositado diretamente no sulco. Há também a variante com grade, cujos discos realizam sulcos no solo, nos quais é depositado o adubo.

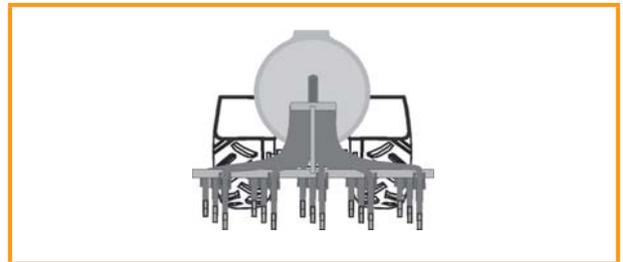


Figura 10.5: Cultivador de distribuição de esterco

A tabela 10.9 contém uma visão geral das técnicas de deposição de adubos orgânicos líquidos e biofertilizantes. Vale ressaltar que há inúmeras técnicas disponíveis que podem ser utilizadas conforme o tipo de cultura, seu estágio de desenvolvimento e condições do local. As limitações técnicas e condicionadas ao local de deposição fazem com que uma parte do amônio sempre seja liberada para a atmosfera na forma de amônia.

10.4 Tratamento de biofertilizantes

O número e o porte das usinas de biogás vêm aumentando na Alemanha. Ao mesmo tempo, está havendo a intensificação da criação de gado, que em algumas regiões já conta com rebanhos de elevada densidade. Em função disso, há uma elevada oferta de adubos orgânicos em algumas regiões, e muitas vezes já não é mais possível aproveitar os biofertilizantes no próprio local. Embora esses adubos tenham grande potencial nutritivo, podem sobrecarregar os ciclos de nutrientes quando não utilizados corretamente. Para aproveitar esse potencial da melhor forma, pode ser necessário e oportuno elevar a concentração dos nutrientes do adubo a fim de que ele possa ser transportado para regiões com carência de nutrientes.

A seguir, é descrito o estado da técnica e os processos de separação de nutrientes dos biofertilizantes. A concentração de nutrientes possível e os custos e a funcionalidade dos processos são coletados e avaliados. A utilidade dos processos é avaliada conforme a comparação entre os atuais custos do tratamento dos biofertilizantes.

Tabela 10.9: Redução das perdas de amônia após a deposição de biofertilizantes líquidos^a [10-7, ajustados]

Técnicas/medidas de redução	Áreas de aplicação	Redução das emissões [%] Biofertilizante		Restrições
		Viscoso	Pouco viscoso	
Processo com reboque de mangueiras	Terra cultivável: Limpa	8	30	Inclinação não muito acentuada, tamanho e forma da área, biofertilizante viscoso, distância entre as vias de circulação, altura do plantio
	Cobertura > 30 cm	30	50	
	Pasto: Cobertura até 10 cm	10	30	
	Cobertura até > 30 cm	30	50	
Processo com reboque de sapatos	Terra cultivável	30	60	Como o anterior, não em solos muito pedregosos
	Pasto	40	60	
Processo de sulcos	Pasto	60	80	Como o anterior, não em solos muito pedregosos, secos e compactados, custo de tração elevado
Cultivador de distribuição de esterco	Terra cultivável	> 80	> 80	Como o anterior, não em solos muito pedregosos, custo de tração muito elevado, utilização restrita em lavoura com cobertura (culturas em filas)
Incorporação imediata (em 1 h)	Terra cultivável	90	90	Com implemento leve (grade) após preparo inicial do solo, com cultivador/arado após colheita

a. Até o presente há poucos estudos sobre a redução de emissões de biofertilizantes; os dados são derivados de estudos realizados com esterco de origem bovina e suína.

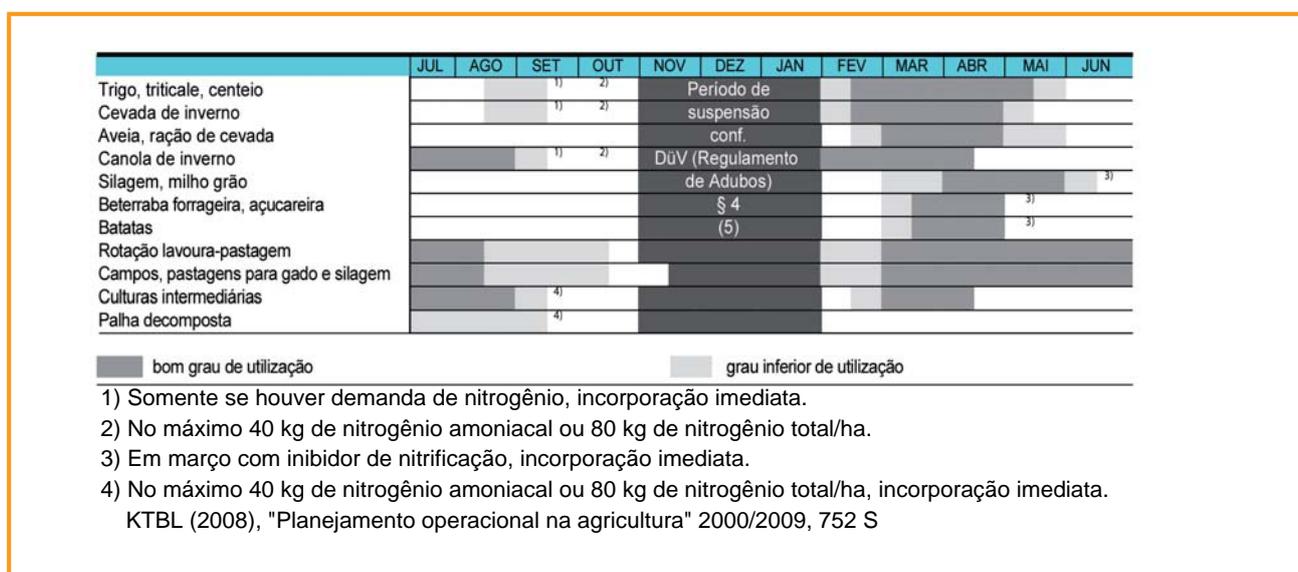


Figura 10.6: Períodos de deposição para biofertilizantes

10.4.1 Técnicas de tratamento

A forma mais simples de utilizar os biofertilizantes é depositá-los diretamente como adubo nas áreas agrícolas sem tratamento prévio. Cada vez em mais regiões, essa forma de aproveitamento próxima à usina é inviável ou restrita. Os altos preços de arrendamentos

de áreas propícias e o alto custo do transporte devido às longas distâncias são obstáculos para que o seu uso seja econômico. Para viabilizar o transporte dos biofertilizantes, são desenvolvidos e empregados diferentes métodos baseados em processos físicos, químicos ou biológicos (figura 10.7).

A seguir, são descritos os processos físicos.

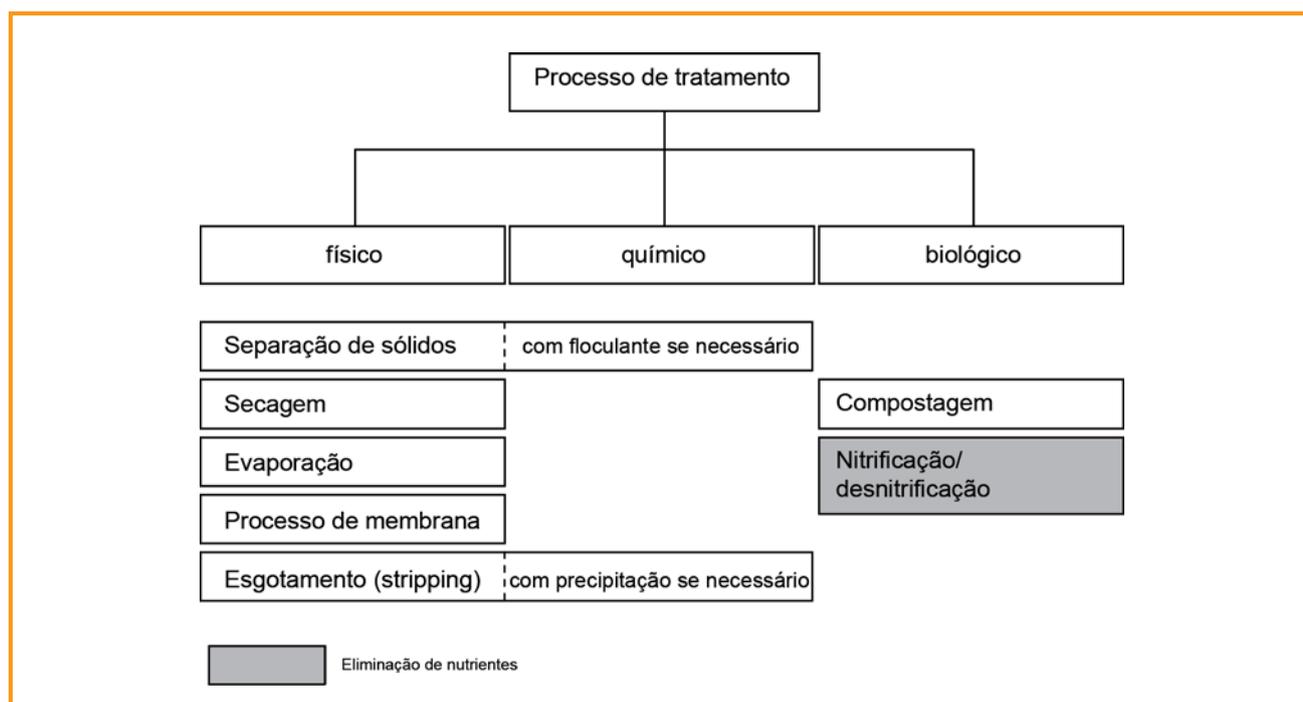


Figura 10.7: Classificação dos processos de tratamento conforme o seu princípio.

10.4.1.1 Utilização de biofertilizantes sem tratamento (armazenamento e deposição do biofertilizante não tratado)

Em favor do ciclo de nutrientes, é desejável que os biofertilizantes sejam lançados na mesma área em que foram cultivadas as culturas energéticas processadas na usina. Normalmente, essas áreas se situam nas imediações da usina de biogás, de forma que as distâncias são curtas e o transporte e a deposição do material podem ser realizados com o mesmo veículo sem necessidade de transferir a carga (fase única). No caso de distâncias superiores a cerca de 5 km, o transporte e a deposição são feitos com equipamentos diferentes. De forma geral, o aumento da distância de transporte eleva significativamente os custos de ambos os processos, pois os teores de nutrientes dos biofertilizantes em relação à massa transportada são relativamente baixos. O tratamento dos biofertilizantes, portanto, tem como objetivo reduzir o teor de água e aumentar a concentração dos nutrientes.

10.4.1.2 Separação de sólidos

A separação de sólidos é o principal processo no tratamento de biofertilizantes. A separação de sólidos tem as vantagens de reduzir o volume de armazenamento de biofertilizantes líquidos e reduzir o sobrenadante e

a camada de sedimentos. No entanto, ocorre principalmente a separação de nutrientes, pois a maior parte do nitrogênio livre, mineral, permanece na fase líquida, enquanto o nitrogênio orgânico fixado e o fósforo são segregados junto com a fase sólida. A fase líquida separada, pobre em matéria seca, pode ser depositada nas áreas agrícolas ou ser encaminhada ao estágio seguinte de tratamento. A fase sólida pode ser seca ou compostada. Dependendo do grau de separação exigido, são utilizados principalmente separadores de rosca de compressão, prensas de tambor com peneira, prensas desaguadoras e decantadores.

A capacidade de separação desses métodos depende essencialmente das propriedades dos biofertilizantes e dos ajustes do separador. Quanto maior o teor de matéria seca do biofertilizante, maior é a redução de volume que se pode atingir e a quantidade de fósforo e nitrogênio orgânico na fase sólida. Separadores de compressão por rosca permitem até 30% em matéria seca na fase sólida. Embora geralmente não permitam um valor tão elevado de MS, os decantadores são a única forma que permite atingir teores de MS inferiores a 3% na fase líquida, um pré-requisito para fases posteriores de tratamento do líquido. Entretanto, decantadores exigem que a composição do material alimentado seja uniforme, e sofrem mais desgaste e consomem mais energia que separadores.

Para melhorar a capacidade de segregação, em certos casos são utilizados floculantes no processo de separação. Nesses casos, deve-se observar as disposições legais sobre os adubos.

10.4.1.3 Tratamento posterior da fase sólida

É possível realizar a deposição da fase sólida imediatamente após a separação. Como, porém, pode ocorrer a imobilização do nitrogênio, a emissão de odores ou a dispersão de sementes de ervas daninhas, os sólidos separados normalmente são submetidos a um segundo tratamento.

Compostagem

A compostagem é um tratamento aeróbio de resíduos orgânicos que visa à estabilização dos componentes orgânicos, ao extermínio de microrganismos patogênicos e sementes de ervas daninhas e à eliminação de compostos de forte odor. O processo exige que seja fornecido oxigênio suficiente ao biofertilizante a ser compostado. Como o biofertilizante é um material de estrutura pobre, é preciso adicionar material estruturado (p. ex. cascas de árvores) ou revolver o biofertilizante.

Em virtude da decomposição anaeróbia do carbono na usina de biogás, o autoaquecimento durante a compostagem é reduzido em comparação com o material orgânico não tratado. Durante a compostagem, são atingidas apenas temperaturas de até 55 °C, e não a temperatura mínima de higienização de 75 °C.

A compostagem gerada é comparável à compostagem convencional e pode ser utilizada imediatamente para o enriquecimento do solo [10-25].

Secagem

A secagem pode ser realizada com processos já estabelecidos em outras aplicações. Tais técnicas fazem uso de secadores de tambor, de esteira ou o método de empurramento e revolvimento, entre outros. Na maioria dos sistemas de secagem, o calor é transferido por um fluxo de ar quente que circula sobre ou através do material secado. Essa é uma boa oportunidade de utilizar o calor residual da usina, caso ele não seja utilizado de outra forma.

Grande parte do amônio contido na fase sólida é liberada para o ar de exaustão da secagem na forma de amônia. Por essa razão, pode ser necessário tratar o ar de exaustão para evitar emissões de amônia. Também pode haver a emissão de odores, que se possível devem ser eliminados do fluxo de exaustão pelo acoplamento de um processo de limpeza de ar.

A secagem permite atingir teores de matéria seca de no mínimo 80% da fase sólida. Isso possibilita que ela seja armazenada e transportada.

10.4.1.4 Tratamento posterior da fase líquida

Os baixos teores de matéria seca da fase líquida separada tornam o seu armazenamento e deposição mais fácil que no caso do biofertilizante não tratado. Frequentemente, porém, é desejada mais uma redução do volume e o enriquecimento de nutrientes, o que pode ser atingido pelos seguintes processos.

Processo de separação por membranas

O tratamento de água com elevado conteúdo orgânico por meio da separação por membranas é um processo muito difundido na área de tratamento de esgotos. Com isso, foi relativamente fácil adaptar essa técnica de tratamento completo aos biofertilizantes e aplicá-la em usinas de biogás. Diferentemente da maioria dos processos de tratamento de biofertilizantes, esse processo não necessita de calor. Assim, o processo de separação por membranas também pode ser aplicado em usinas conectadas a uma microrrede de gás ou a uma estação de tratamento de biogás, as quais não dispõem de excedente de calor.

O processo de separação por membranas é uma combinação do processo de filtração com porosidade decrescente seguido da osmose inversa, da qual se origina um permeado descartável e um concentrado enriquecido com alto teor de nutrientes. O concentrado é rico em amônio e potássio, sendo que o fósforo se concentra principalmente no material retido na ultrafiltração. O permeado da osmose inversa é em grande parte isento de nutrientes e sua qualidade é adequada para o descarte. A estimativa assume que as duas fases líquidas, ricas em nutrientes, são misturadas em uma única solução para serem lançadas no campo.

Para evitar o entupimento precoce das membranas, é importante que o teor de MS da fase líquida não ultrapasse 3%. Na maior parte dos casos, isso é atingido pela separação das frações sólida e líquida com um decantador.

Evaporação

A evaporação de biofertilizantes é interessante para as usinas de biogás que dispõem de excedentes de calor, uma vez que o processo exige 300 kWh_{el}/m³ de água evaporada. A aplicação desse processo é restrita em usinas que operam com uma quantidade maior de estercos e, portanto, geram um grande volume de biofertilizante em vista da energia gerada. Na usina-modelo

aqui calculada, para uma proporção de 50% de esterco em massa no substrato carregado, somente 70% do calor necessário é disponibilizado pela usina de biogás. A experiência com equipamentos de evaporação de biofertilizantes ainda é restrita.

O processo se dá normalmente em vários estágios. Após o aquecimento do material, a temperatura é aumentada gradativamente, em ambiente de subpressão, até atingir o ponto de ebulição. Na fase líquida, a adição de ácido serve para reduzir o pH a fim de evitar perdas de amônia. Problemas técnicos operacionais podem ocorrer pelo entupimento e corrosão dos trocadores de calor utilizados. Em um equipamento de evaporação a vácuo, a quantidade de biofertilizante pode ser reduzida em cerca de 70%. O aquecimento do biofertilizante na evaporação a 80 – 90 °C possibilita também a sua higienização.

Em comparação com o material de entrada, a evaporação permite uma concentração de sólidos até 4 vezes maior, o que reduz os custos de transporte e armazenamento. No entanto, não é possível lançar o condensado purificado diretamente em cursos d'água, uma vez que não satisfazem os limites mínimos prescritos por lei.

Esgotamento (stripping)

O esgotamento consiste de um processo capaz de eliminar substâncias de um líquido, pelo qual passam gases (ar, vapor d'água, gás com fuligem, etc.) que retiram do líquido tais substâncias. O amônio é convertido para amônia. A eficiência do processo pode ser aumentada pela elevação da temperatura e pelo aumento do pH, recurso utilizado p. ex. pelo esgotamento a vapor, pois com o aumento da temperatura reduz-se o fluxo volumétrico de gás necessário. Em uma etapa de dessorção a jusante, a amônia da fase gasosa é convertida em um produto que pode ser utilizado ou descartado. A dessorção do NH_3 do fluxo gasoso pode ocorrer por condensação, lavagem com ácidos, ou por reação com uma solução aquosa de gesso. Os produtos finais da dessorção são normalmente o sulfato de amônio ou a água amoniacal.

Assim como na evaporação, nesse caso também não são satisfeitos os limites prescritos por lei para a descarga segura do efluente.

10.4.2 Utilização do biofertilizante tratado

A **fase sólida** da separação tem propriedades equivalentes às da compostagem fresca e, como esta, pode ser utilizada como adubo e para elevar o teor de matéria orgânica nos solos. A Associação Alemã Federal de

Compostagem confere um selo de qualidade com base nos critérios de qualidade para biofertilizantes por ela elaborados. No entanto, a compostagem fresca é utilizada principalmente na agricultura, uma vez que no seu armazenamento e deposição ocorre a emissão de odores. Somente por meio da estabilização dos biofertilizantes p. ex. por meio da compostagem é que se pode obter um produto competitivo no mercado. Com um custo de aprox. 40 €/t de sólido, porém, a estabilização não é economicamente viável. A alternativa é a secagem dos sólidos como descrito anteriormente. O produto por ela obtido pode ser armazenado e transportado, e utilizado especificamente para equilibrar os teores de fósforo e potássio (cf. tabela 10.18) em áreas com excesso de nitrogênio.

A queima dos sólidos secos também é uma opção, embora os biofertilizantes contendo dejetos líquidos ou sólidos estejam excluídos da classificação de combustíveis do Regulamento Alemão de Proteção contra Emissões. Nesse caso, seria necessária uma autorização especial, condicionada pelo cumprimento de uma série de requisitos. Ambígua é a regulamentação pertinente aos biofertilizantes de origem puramente vegetal.

Em algumas usinas de biogás, a **fase líquida da separação** é utilizada como material de recirculação. O reduzido conteúdo de matéria seca permite que a deposição seja precisa e com menos perdas de NH_3 . Em função do teor de fósforo inferior dos biofertilizantes tratados, comparado ao não tratado, permite que sejam utilizados em grande quantidade em regiões com criação de gado intensiva, próximo ao local de produção, pois nessas áreas a deposição normalmente é limitada pelos teores de fósforo dos solos. Um ciclo posterior de tratamento da fase líquida permite resolver o problema regional de excesso de nitrogênio, pois a mera separação não proporciona a redução do volume transportado.

Frequentemente, a comercialização de **produtos ricos em nutrientes da fase líquida tratada** é possível apenas de forma restrita. Embora as suas concentrações de nutrientes sejam maiores que as dos biofertilizantes (tabela 10.16), o que viabiliza o seu transporte, elas são bastantes inferiores às concentrações em adubos minerais. Essa baixa concentração pode, em alguns casos, dificultar o aproveitamento em função da falta de equipamentos adequados para realizar a deposição. A deposição com distribuidores com reboque de mangueiras, usado para a deposição de dejetos líquidos e biofertilizantes, necessita de grandes volumes de produto para que os nutrientes possam ser lançados uniformemente na área. Adubos líquidos minerais, por exem-

plo a solução de nitrato de amônio e ureia com 28% de nitrogênio, são comumente depositados com pulverizadores agrícolas, que, porém, têm uma capacidade limitada. Equipamentos convencionais dificilmente permitem a deposição de volumes superiores a 1 m³/ha.

A solução de sulfato de amônio (SA) proveniente do processo de esgotamento é a que mais se aproxima dos requisitos de um produto tratado. Com um teor de nitrogênio de quase 10%, essa solução já é utilizada comercialmente como adubo em larga escala pela agricultura, sendo obtida pela purificação do ar de exaustão e como subproduto da indústria química.

As estimativas econômicas não consideraram custos ou receitas da utilização de **produtos do trata-**

mento da fase líquida ricos ou enriquecidos com nutrientes. A sua venda só é viável caso haja compradores interessados em obter águas residuárias. É mais provável que esse seja o caso do processo de separação por membranas, cujo permeado da osmose inversa pode ser despejado em cursos d'água. Uma opção para quase todos os produtos sem nutrientes seria o uso em irrigação ou rega por aspersão. A descarga direta em cursos d'água é possível para produtos com a respectiva autorização. Caso não haja essas possibilidades, é necessária a conexão a uma estação de tratamento com suficiente capacidade hidráulica e biológica, e os custos envolvidos devem ser considerados.

Tabela 10.10: Teores de nutrientes das frações, calculados para os processos de tratamento por meio de modelos matemáticos

Processo de tratamento	Fração	Concentração em massa	N _{org}	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		%	kg/t	kg/t	kg/t	kg/t
Sem tratamento	Líquida		2,0	3,6	2,1	6,2
Separação	Sólida	12	4,9	2,6	5,5	4,8
	Líquida	88	1,6	3,7	1,6	6,4
Secador de esteira	Sólida	5	13,3	0,7	14,9	12,9
	Líquida	88	1,6	3,7	1,6	6,4
	Exaustão	7	-	-	-	-
Membrana	Sólida	19	4,9	4,4	6,8	4,5
	Líquida	37	2,8	7,4	2,1	14,4
	Efluentes (tratados)	44	Valores-limite atingidos para descarga em cursos d'água			
Evaporação	Sólida	19	4,9	4,4	6,8	4,5
	Líquida	31	3,4	8,9	2,5	17,3
	Águas residuárias	50	inadequadas para descarga em cursos d'água			
Esgotamento (stripping)	Sólida	27	6,8	3,5	7,5	21,7
	Líquida (SA)	3	0,0	80,6	0,0	0,0
	Águas residuárias	70	inadequadas para descarga em cursos d'água			

SA: solução de sulfato de amônio

Tabela 10.11: Avaliação dos processos para o tratamento de biofertilizantes

	Separação	Secagem	Processo de separação por membranas	Evaporação	Esgotamento (stripping)
Confiabilidade operacional	++	+/o	+	o	o
Grau de disseminação	++	+	+	o	o
Custos	+	+/o	o/-	o	+/o
Aproveitamento dos produtos					
Fase sólida	o	+/o	o	o	o
Líquida (rica em nutrientes)	o	o	+	+	++
Líquida (pobre em nutrientes)			+	o	o

++ = muito bom, + = bom, o = médio, - = insuficiente

10.4.3 Comparação dos processos de tratamento de biofertilizantes

Os processos de tratamento de biofertilizantes aqui apresentados são bastante distintos quanto à sua popularidade e confiabilidade operacional (tabela 10.17). Esses processos já são amplamente utilizados e correspondem ao estado da técnica. O tratamento parcial, todavia, normalmente não propicia a redução de volume, e o custo de deposição do biofertilizante aumenta.

Os processos de secagem da fase sólida já se encontram estabelecidos em outras áreas de aplicação e são adaptados à secagem de biofertilizante. Apenas alguns detalhes técnicos têm de ser resolvidos. Entretanto, a secagem de biofertilizantes só é interessante do ponto de vista econômico se, após a secagem, o fertilizante for destinado a finalidades lucrativas, ou se não houver alternativa para utilizar o calor residual da usina de biogás.

Os processos de tratamento da fase líquida não correspondem ao estado da técnica e o consenso é que há ainda muito espaço para aperfeiçoamento. De todas as técnicas, a que se encontra em estágio mais avançado é o processo de separação por membranas. Ela é oferecida no mercado por diversos fabricantes e há várias usinas de referência operando com esse processo, em sua maioria com boa confiabilidade. Mesmo assim, a técnica ainda pode ser aperfeiçoada visando à redução do consumo de energia e do desgaste. Alguns aspectos dessa tecnologia já estão sendo aperfeiçoados, p. ex. a separação dos sólidos, que proporcionará maior vida útil das membranas e menor consumo energético.

Os processos de evaporação e esgotamento ainda não estão avançados em processos contínuos de grande porte. Por essa razão, a avaliação econômica e a qualidade esperada dos produtos ainda estão sujeitas a muita incerteza, e os riscos técnicos são relativamente altos.

10.5 Fontes bibliográficas

- [10-1] H. Döhler, K. Schießl, M. Schwab (1999): BMBF – Förderschwerpunkt, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung. KTBL Folha de trabalho 272. KTBL Darmstadt.
- [10-2] LTZ (2008): Inhaltsstoffe in Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Relatório de projeto, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ).
- [10-3] KTBL (2005): Schwermetalle und Tierarzneimittel in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 435, 79 S.
- [10-4] Klingler, B. (1996): Hygienisierung von Gülle in Biogasanlagen. In: Biogas-Praxis Grundlagen-Planung-Anlagenbau-Beispiele. Ökobuch Staufien bei Freiburg: 141
- [10-5] Philipp, W.; Gresser, R.; Michels, E.; Strauch, D. (1990): Vorkommen von Salmonellen in Gülle, Jauche und Stallmist landwirtschaftlicher Betriebe in einem Wasserschutzgebiet.
- [10-6] Steinmüller, S., Müller, P., Pietsch, M. (2007): Phytohygienische Anforderungen an Klärschlämme – Regelungsnotwendigkeiten und -möglichkeiten. In: Perspektiven der Klärschlammverwertung, Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift 453, KTBL, Darmstadt
- [10-7] Döhler et al. (2002): Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Erfassung und Prognose der Ammoniakemissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010, Berlin
- [10-8] FNR (2009): Ergebnisse des Biogasmessprogramm II, Gülzow
- [10-9] Clemens, J., Wolter, M., Wulf, S., Ahlgrimm, H.-J. (2002): Methan- und Lachgas-Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, in: KTBL-Schrift 406, Emissionen der Tierhaltung, pp. 203 – 214
- [10-10] Roth, U., Niebaum, A., Jäger, P. (2006): Gasdichte Abdeckung von Gärrestlagerbehältern – Prozessoptimierung und wirtschaftliche Einordnung. In: KTBL-Schrift 449 (2006): Emissionen der Tierhaltung. Messung, Beurteilung und Minderung von Gasen, Stäuben und Keimen. KTBL, Darmstadt, 328 S.
- [10-11] Niebaum, A., Roth, U., Döhler, H. (2008): Bestandsaufnahme bei der Abdeckung von Gärrestlagerbehältern. In: Emissionsvermeidung beim Betrieb von Biogasanlagen : Forum de especialistas da KRdL, 4 de novembro de 2008, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn. Düsseldorf : Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, 6 S.
- [10-12] Döhler, H. (1996): Landbauliche Verwertung stickstoffreicher Abfallstoffe, Komposte und Wirtschaftsdünger. In Wasser und Boden, 48 Jahrgang. 11/1996

- [10-13] ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.), Energiereferat der Stadt Frankfurt (2005): BHKW-Kenndaten 2005 – Module, Anbieter, Kosten. Fascículo, Kaiserslautern
- [10-14] Döhler H; Menzi H, Schwab M (2001) : Emissionen bei der Ausbringung von Fest- und Flüssigmist und Minderungsmaßnahmen. KTBL / UBA – Simpósio, Kloster Banz.
- [10-15] Gutser, R. (2008): "Optimaler Einsatz moderner Stickstoffdünger zur Sicherung von Ertrag und Umweltqualität", palestra em 02.02.2006 realizada no congresso Fachtagung Düngung in Böslieben (TU München)
- [10-16] KTBL (2009): Strompreise aus Biomasse – Vergütungsrechner für Strom aus Biogas.
<http://www.ktbl.de/index.php?id=360>
- [10-17] Körschens, Martin et al. (2004): Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. VDLUFA Standpunkt, Bonn
- [10-18] EEG (2008): Lei Alemã de Energias Renováveis (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG). 25 de outubro de 2008, BGBl. I: 2074
- [10-19] DüngemittelV (2008): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung, DüMV). 16. Dezembro de 2008, BGBl. I: 2524
- [10-20] DüV (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Neufassung der Düngeverordnung (27.02.2007); BGBl I, 221
- [10-21] 1774/2002 (2002): Regulamento (CE) nº 1774/2002 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 3 de outubro de 2002, que estabelece regras sanitárias relativas aos subprodutos animais não destinados ao consumo humano (JO L 273 de 10.10.2002)
- [10-22] TierNebV (2006): Verordnung zur Durchführung des Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetzes (Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung – TierNebV) de 27 de julho de 2006. BGBl. I:1735
- [10-23] BioAbfV (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV) de 21 de setembro de 1998. BGBl. I: 2955
- [10-24] E-BioAbfV (2008): Esboço: Verordnung zur Änderung der Bioabfallverordnung und der Tierischen Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung (19.11.2007). Artigo 1: Alteração da Bioabfallverordnung. BMU, WA II 4 – 30117/3
- [10-25] Ebertseder, T., (2007): Düngewirkung von Kompost und von flüssigen Gärrückständen im Vergleich. Humus und Kompost 172008, pp. 64 – 67,
- [10-26] Faustzahlen Biogas (2009), 2ª edição revista e ampliada, KTBL (Hrsg.), Darmstadt

Realização de um Projeto



A concretização de um projeto de biogás abrange várias etapas, começando pelo conceito e estudo da viabilidade, passando pelo planejamento da usina e finalizando com a sua entrada em funcionamento. Durante a realização do projeto, o promotor do projeto (p. ex. o empresário agrícola) pode assumir diversas fases da implementação, dependendo do seu envolvimento e dos recursos humanos e financeiros disponíveis. A figura 11.1 exibe as diferentes fases: a geração de ideias, o estudo de viabilidade, a preparação do investimento, o licenciamento, a construção da usina e sua entrada em operação.

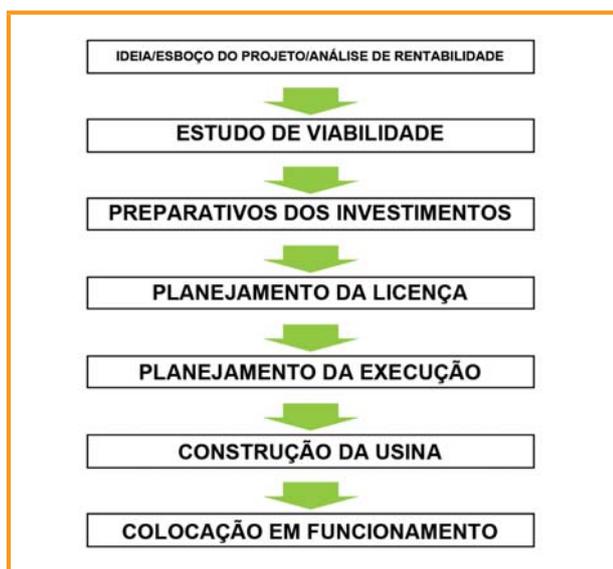


Figura 11.1: Etapas de realização de um projeto para a geração e aproveitamento de biogás

A seguir são apresentadas checklists resumidas com o intuito de fornecer uma visão geral das etapas de realização e explicar os principais trabalhos de um projeto.

11.1 Ideia e esboço do projeto

Após o projeto de biogás ter sido decidido, recomenda-se que o promotor do projeto elabore um esboço como base para a concretização e referência para a avaliação do empreendimento. O esboço do projeto serve como base para estudar a viabilidade técnica específica do local, avaliar a possibilidade inicial de financiamento e fomento, e estabelecer o primeiro contato com potenciais escritórios de engenharia. É recomendável que se obtenham antecipadamente informações de operadores de usinas sobre os procedimentos de planejamento e a respeito da operação da usina, especialmente daquelas que utilizam o mesmo substrato que se pretende adotar.

Em projetos de biogás, é importante que se analise o sistema completo: desde a disponibilidade do substrato, passando pela usina de geração de biogás propriamente dita, até a distribuição de energia para o comprador. É importante, para isso, que as três áreas mostradas na figura 11.2 sejam consideradas com o mesmo grau de detalhamento desde o início do projeto, o que permitirá uma avaliação bem fundamentada da ideia inicial.

Para evitar encargos adicionais em etapas de planejamento posteriores, o esboço do projeto deve ser criado conforme as etapas de trabalho a seguir e avaliado com o auxílio dos cálculos apresentados neste guia (cf. capítulo 8):

1. Determinar e verificar a quantidade de substrato disponível; definir a cadeia de disponibilização de biomassa
2. Realizar um dimensionamento técnico aproximado da usina
3. Verificar as áreas disponíveis para sua instalação
4. Estimar custos, subsídios e eficiência econômica
5. Avaliar a estratégia de captação de energia
6. Estimar a viabilidade do licenciamento e a aceitação da usina pela população local.

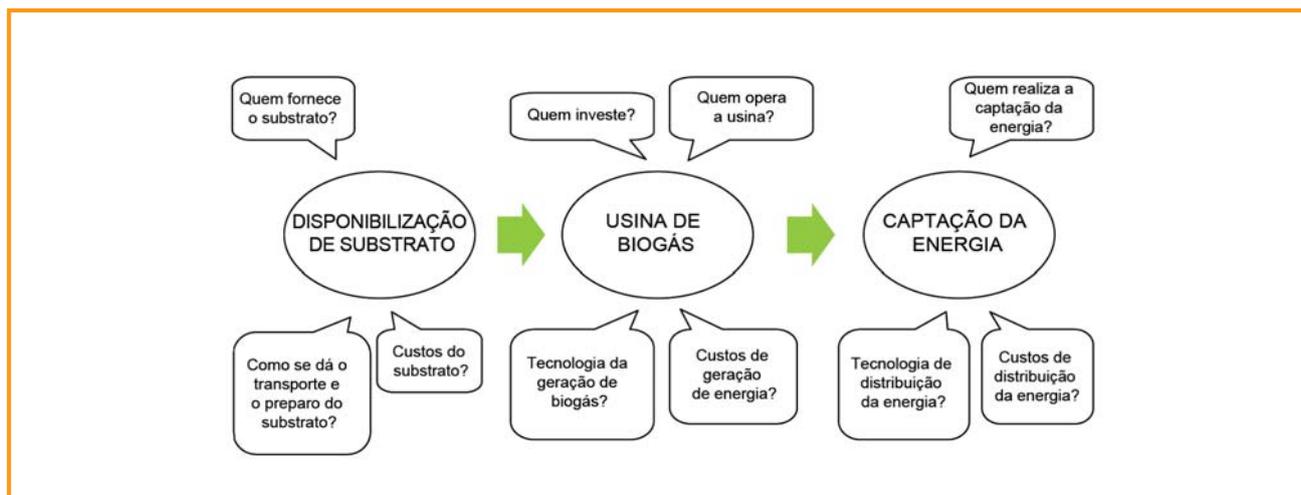


Figura 11.2: Diagrama sintético do planejamento de uma usina de biogás

1ª etapa: Elaboração do esboço do projeto

Verificar a disponibilidade de substratos a longo prazo	<p>Que substratos próprios estarão disponíveis a longo prazo?</p> <p>Pretendo modificar a minha propriedade no médio/longo prazo?</p> <p>Que impacto isso terá sobre a minha usina? (do ponto de vista da biologia/substrato, processos, energético)</p> <p>Posso contar com substratos de fora da minha propriedade no longo prazo?</p> <p>Compensa utilizar esses substratos conforme as exigências da legislação? (questão de proporcionalidade)</p>
Visitas em usinas de biogás	<p>Visitas técnicas como oportunidade de obter experiência e informações!</p> <p>Que opções construtivas são oferecidas no mercado?</p> <p>Onde ocorrem problemas construtivos/de processos?</p> <p>Como esses problemas foram resolvidos?</p> <p>Que experiência os operadores têm feito com diferentes componentes e combinações de substratos?</p>
Verificar a própria disponibilidade de tempo	<p>Deve-se verificar o tempo necessário para os trabalhos de rotina, inspeção e manutenção (ver capítulo 9.1.3).</p> <p>Essa demanda é consoante com a situação da minha propriedade?</p> <p>Que esquema de horário de trabalho é compatível com a rotina familiar? (p. ex. quem sucederá no comando da empresa?)</p> <p>É necessário contratar mão de obra externa?</p>
Verificar a possibilidade de aproveitar o calor	<p>É possível fornecer calor para fora da empresa?</p> <p>Que quantidades de calor podem ser fornecidas mensalmente?</p>
Determinação do orçamento disponível	<p>Avaliação dos recursos em caixa</p> <p>Qual é a estimativa da evolução de renda?</p> <p>A situação ou condições do patrimônio se alterarão drasticamente em um futuro próximo?</p>
Objetivos da 1ª etapa:	<ul style="list-style-type: none"> - Primeira avaliação das possibilidades do empreendimento - Busca por experiências práticas - Conhecimentos do mercado sobre a oferta de usinas/componentes

Na avaliação inicial do projeto, não é preciso decidir definitivamente sobre os aspectos acima, pois isso é feito na fase seguinte de planejamento. É importante, porém, que haja no mínimo uma solução, se possível várias soluções para uma concretização bem-sucedida de cada aspecto.

11.2 Estudo de viabilidade

Com base no seu esboço, se o promotor do projeto da usina decidir continuar com a empreitada, é necessário elaborar um estudo de viabilidade. Ele é essencialmente baseado no esboço do projeto e enfoca a determinação e verificação detalhada de todos os dados iniciais técnicos, econômicos e demais informações. Ao contrário do esboço do projeto, que contém a primeira avaliação qualitativa do empreendimento, o es-

tudo de viabilidade compreende uma avaliação quantitativa do projeto almejado e suas possíveis formas de realização.

Os critérios do estudo de viabilidade para um projeto de usina de biogás conforme a figura 11.3 serão abordados com detalhe ao longo do capítulo.

O estudo de viabilidade fornece um documento para a tomada de decisões com os seguintes objetivos:

- Análise da viabilidade técnica e econômica do projeto com base no levantamento de todas as condições básicas e pré-requisitos específicos do local
- Estimativa do risco técnico e econômico
- Identificação dos critérios de exclusão
- Checagem das possíveis estruturas operacionais e organizacionais
- Criação de uma base para a preparação de um pedido de subsídio
- Criação de uma base para a avaliação da viabilidade econômica.

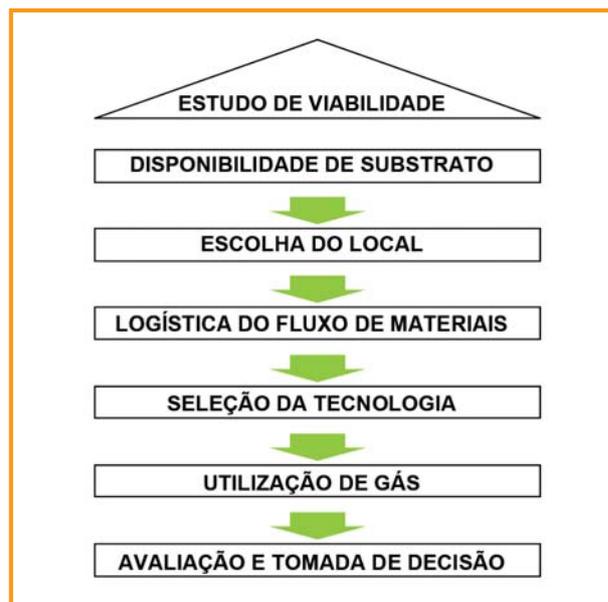


Figura 11.3: Critérios do estudo de viabilidade de usinas de biogás

2ª etapa: Elaboração do estudo de viabilidade

Contratação de um escritório de engenharia experiente e reputado ou do departamento de planejamento de um fabricante de usinas experiente e reputado	Os técnicos do escritório/fabricante têm grande importância no desenvolvimento e planejamento do projeto e estarão envolvidos em todas as etapas. Eles mantêm contato com funcionários das autoridades que concedem a licença e com os chefes de secretarias estaduais.
Contato com consultores agrícolas	Os consultores dispõem de experiência na construção e operação de usinas de biogás e prestam auxílio esclarecendo questões diversas como a escolha do local e seus requisitos, concepção, execução e início de operação.
Estipulação dos modos e procedimentos de construção, bem como dimensionamento da usina	Definição das características do local, p. ex. obtenção do parecer técnico sobre o solo. Escolha do local (auxílio da planta da propriedade, edificações, áreas de silagem). Localização do ponto de injeção de gás ou eletricidade mais próximo Decisão sobre o uso da configuração/construção de usina mais adequado e da tecnologia, considerando a orientação da propriedade no futuro e medidas de reestruturação das operações em função da usina de biogás. Dimensionamento dos componentes da usina conforme a análise de potencial. Questão de procedimento: como o projeto deverá ser executado? A usina deverá ser construída pronta para o uso (projeto <i>turn-key</i>)? Os trabalhos especializados deverão ser contratados separadamente? Quanto e quais trabalhos serão com recursos próprios? A usina poderá ser construída em cooperativa? Que trabalhos especializados serão anunciados detalhadamente aos fornecedores potenciais? (p. ex. trabalhos de solo, sistemas elétricos...) Permitir espaço para variações na execução!
Objetivos da 2ª etapa:	- Solicitação a um engenheiro ou consultor experiente que elabore um estudo de viabilidade - Definição da preferência do porte da usina, com procedimentos e métodos construtivos e possíveis pontos de injeção de eletricidade, calor ou biogás tratado

11.2.1 Disponibilidade de substrato

Para a construção e operação de uma usina de biogás, é crucial que se esclareça a questão da disponibilidade do substrato ao longo do ano e se é suficiente para o carregamento da usina. Nesse contexto, deve-se investigar a que custo a obtenção do substrato é viável. Propriedades agrícolas com criação de gado têm a vantagem do acesso ao substrato (esterco líquido, esterco ou adubo) a custo baixo e sem logística complexa, no próprio local da usina, ao mesmo tempo em que podem aprimorar a qualidade do adubo orgânico pelo processo de digestão (cf. capítulo 4.1). Para propriedades que produzem unicamente cultivos agrícolas, a disponibilidade de substrato depende apenas da disponibilidade de áreas agrícolas e dos custos de fornecimento associados [11-1]. O tipo e disponibilidade de substrato determina o tipo de equipamento adotado na usina de biogás. Abaixo se encontra uma checklist para determinar a disponibilidade de substrato.

3ª etapa: Disponibilidade de substrato

Delimitação dos substratos disponíveis	<p>Que biomassas se encontram à disposição:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resíduos agrícolas da agricultura (p. ex. esterco líquido bovino, esterco de aves) - Resíduos agroindustriais (p. ex. bagaço destilado de maçã, bagaço de frutas) - Resíduos da indústria e comércio (p. ex. restos de raspagem de gordura) - Resíduos domésticos (p. ex. lixo orgânico) - Culturas energéticas, plantas energéticas (p. ex. silagem de milho, silagem de gramíneas) <p>Em que intervalos os substratos estão disponíveis? Qual é a qualidade dos substratos fornecidos?</p>
--	--

Fornecedores de biomassa	Que fornecedores potenciais podem disponibilizar a biomassa em longo prazo?
--------------------------	---

Custos de fornecimento	Quanto custa o fornecimento dos substratos?
------------------------	---

Áreas de armazenamento	Qual é o tamanho das áreas de armazenamento a reservar no local planejado?
------------------------	--

Medidas de pré-tratamento	Que medidas de pré-tratamento (homogeneização, fragmentação) exigem o substrato a ser utilizado?
---------------------------	--

Objetivos: 3ª etapa	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção dos substratos visando a viabilidade do processo de digestão na prática - Restrição das medidas de pré-tratamento e tratamento de substrato - Escolha dos fornecedores potenciais de biomassa
--------------------------------------	---

11.2.2 Seleção do local

Na seleção do local de construção de uma usina de biogás, devem-se considerar, por um lado, as características específicas locais (subsolo adequado para a construção, utilização até o momento, conexões a condutores, etc.), as quais têm peso principalmente nos custos de construção, e por outro lado as disposições legais pertinentes à construção, bem como aspectos sociais. Os critérios de escolha do local para a construção de uma usina de biogás se encontram esquematizados na figura 11.4.



Figura 11.4: Critérios de eleição do local da usina

11.2.2.1 Aspectos específicos do local

É necessário primeiramente analisar se o local desejado tem o tamanho necessário, se o subsolo é adequado e, tanto quanto possível, isento de contaminação, se edifícios e locais de armazenamento existentes podem ser aproveitados, e se há a presença de consumidores de calor (cf. 9.1.1). Essas considerações têm o intuito de manter os custos de construção o mais baixo possíveis. As faixas de potências da produção agrícola de biogás, relativamente baixas, e os fluxos de substrato associados permitem que o fornecimento da matéria-prima e a disposição da biomassa fermentada ocorra pelo transporte viário. Em função da sua baixa densidade energética, muitos substratos têm um custo de transporte inviável. Por isso, as usinas de biogás se concentram na obtenção principalmente da biomassa disponível na própria região. São favorecidos locais próximos a estradas com potencial de trânsito médio [11-3].

11.2.2.2 Aspectos da legislação de construção

A legislação de construção civil alemã distingue, nas cidades, as áreas interiores das exteriores. A área interior abrange todas as áreas no interior da localidade, e a área exterior é a superfície além do perímetro urbano. Essa diferenciação se encontra demarcada nos planos de ocupação de cada localidade. Para inibir o crescimento urbano descontrolado, a construção na área exterior está sujeita a restrições. Conforme a Lei Alemã de Construção (BauGB) § 35 (1), se a construção de uma usina de biogás na área exterior for permitida sob determinadas condições, tal usina é considerada como privilegiada. Além disso, deve-se considerar aspectos legais relativos ao controle de emissões, bem como possíveis regulamentos pertinentes à intervenção na natureza e paisagem (p. ex. medidas compensatórias).

11.2.2.3 Aspectos sociais

A experiência mostra que a intenção de construir uma usina de biogás, principalmente em áreas rurais, pode gerar discussões em relação à aceitação por parte da população ou instituições. Esse problema pode afetar particularmente a viabilidade do licenciamento. Principalmente os efeitos negativos tais como emissões de odores e ruídos, aumento do trânsito nas vias públicas, aspecto visual do entorno do local, temidos pela população, podem gerar resistência contra a construção da usina. É portanto imprescindível que se tomem medidas preventivas visando a melhoria da aceitação, tais como informar e envolver os moradores e instituições afetados e realizar um trabalho dirigido de relações públicas, com o objetivo final de garantir a aceitação do local escolhido para a construção da usina.

4ª etapa: Seleção do local	
Examinar a área	Quais são as características do terreno? O subsolo é adequado? O terreno se encontra em uma área industrial (margem da cidade) ou em um local de operação agrícola na área externa (privilegiada)? Quais são os custos do terreno?
Verificar a infraestrutura	A conexão viária é compatível com o trânsito de caminhões? O terreno dispõe de que conexões (energia elétrica, água, água residual, telefonia, gás natural)?
Verificar se o local permite a injeção de energia elétrica	Qual é a distância do ponto de injeção de eletricidade mais próximo?
Verificar a possibilidade de aproveitar o calor	Há possibilidade de exportar calor para além das instalações da usina? É possível aproveitar o calor residual do processo de cogeração nas próprias operações? Os custos/trabalho de remodelação são proporcionais ao aproveitamento? Que quantidades de calor podem ser fornecidas mensalmente? É possível instalar uma usina satélite de cogeração; usinas de cogeração fisicamente separadas da usina de biogás e ligadas ao gasômetro por meio de uma longa tubulação de gás?
Verificar as possibilidades de injeção de biogás	O local oferece a possibilidade de injetar o biogás tratado em uma rede de gás natural próxima? (cf. capítulo 6.3)
Promoção da aceitação	Que residentes e empresas são afetados? Que residentes e empresas deve ser informados do projeto de antemão e envolvidos no processo? Quem são os potenciais consumidores do calor? Que instituições públicas devem ser incluídas precocemente em um trabalho de relações públicas transparente (p. ex. envolvimento de prefeitos, autoridades de licenciamento)? Que interesses da proteção da natureza devem ser considerados?
Objetivos da 4ª etapa	- Eleição do local - Seleção do tipo de uso do biogás (usina de cogeração no local, instalação de uma usina satélite de cogeração ou tratamento de biogás e injeção na rede de gás natural) - Promoção da aceitação por trabalho transparente de relações públicas

11.2.3 Logística do fluxo de materiais

No contexto da estrutura descentralizada de produção de biomassa e no âmbito da estrutura, centralizada e descentralizada, de consumo, a logística da biomassa assume uma posição relevante na cadeia total de fornecimento. Ela abrange todas as atividades relacionadas à empresa e mercado focadas na disponibilização de um substrato. O foco é na orientação ideal do fluxo de material e informações do fornecedor para o consumidor.

A seleção das cadeias logísticas de fluxo de materiais e a consequente contratação com um ou mais fornecedores de biomassa a longo prazo é especialmente importante em vista do abastecimento constante necessário nas usinas. O ideal é que o contrato seja firmado com os fornecedores da biomassa antes mesmo da construção da usina. Ainda no estágio de planejamento é possível compatibilizar a usina em si com o dimensionamento das áreas de armazenamento e dos reservatórios com vistas ao respectivo substrato e intervalos de fornecimento, permitindo compensar osci-

lações de quantidades de substrato fornecidas no local. É importante que antes de elaborar o contrato se esclareça que parâmetros são relevantes para a contabilidade. Via de regra, a contabilidade se dá pela quantidade/volume de biomassa fornecido (p. ex. em t, m³). Para isso, deve-se estipular requisitos de qualidade detalhados para minimizar o risco de substratos de baixa qualidade.

O preparo (fragmentação e homogeneização) e o carregamento dos substratos no biodigestor são realizados por equipamentos de dosagem adequados (transportadores helicoidais) (cf. capítulo 3.2.1). Dentro da usina, o transporte de substratos é realizado principalmente por bombas elétricas. A escolha das bombas apropriadas depende, em grande parte, dos substratos utilizados e de seu grau de preparo.

A seguir se encontra uma checklist com considerações pertinentes à logística do fluxo de materiais (5ª etapa).

5ª etapa: Logística do fluxo de materiais	
Definição e atualização das quantidades de fluxo de materiais	<p>Que quantidades de substrato devem-se considerar no cálculo?</p> <p>Qual é o raio médio em que se encontram os fornecedores de substrato em potencial?</p> <p>Qual é o padrão de produção do substrato ao longo do ano?</p> <p>Quais são as propriedades dos substratos utilizados?</p>
Definição da cadeia de fornecimento do substrato	<p>Quais são as vias de fornecimento de substrato mais eficazes para a usina planejada?</p> <p>Que tipos de armazenamento de longo e curto prazo existem no local planejado?</p> <p>Que etapas de preparo e dosagem são necessárias?</p> <p>Até que ponto há incerteza quanto ao preço de compra dos substratos?</p>
Escolha dos fornecedores de substrato e dos consumidores da biomassa fermentada	<p>Que condições de fornecimento e requisitos de qualidade do substrato devem ser acordados com os fornecedores? (p. ex. cálculo das quantidades/volumes fornecidos)</p> <p>Existem consumidores da biomassa fermentada?</p>
Transporte do substrato na usina	<p>Que tecnologias de transferência e transporte devem ser utilizadas no local da usina?</p> <p>Que tecnologias de bombeamento e transferência devem ser aplicadas na usina?</p>
Definição do armazenamento de biofertilizantes	<p>Qual é a quantidade de biofertilizante produzido?</p> <p>Que tipos de armazenamento de biofertilizantes são possíveis do ponto de vista construtivo?</p> <p>Que tipo de transporte e intervalos de deposição dos biofertilizantes devem ser planejados?</p>
Objetivos da 5ª etapa	<ul style="list-style-type: none"> - Definir as técnicas de transporte e transferência - Limitar a área de armazenamento de substrato e biofertilizante no local da usina de biogás - Selecionar os fornecedores de biomassa e consumidores de biofertilizantes - Estipular as condições de fornecimento e, se possível, contratos de longo prazo

11.2.4 Selecionar a tecnologia

De acordo com o estado atual da tecnologia de biogás utilizada na prática, a seleção da tecnologia em um projeto de biogás é baseada principalmente nos substratos disponíveis (cf. capítulo 3), infraestrutura existente, atores envolvidos e a viabilidade do financiamento. A seguir, é apresentada uma checklist para a seleção da tecnologia (6ª etapa).

6ª etapa: Seleção da tecnologia	
Seleção do processo de digestão	A usina deverá operar com digestão úmida, a seco ou uma combinação de ambas? Com que estágios de processo e em quais temperaturas deverá operar a usina?
Seleção dos componentes da usina	Que componentes deverão ser utilizados? - Equipamentos de recepção, preparo e carregamento - Arquitetura do biodigestor com componentes instalados e equipamentos de agitação - Tipo de gasômetro - Tipo de armazenamento da biomassa fermentada - Utilização do biogás
Atores envolvidos	Que agroempresas e firmas serão parceiras na rede? Que experiência têm os envolvidos? Que empresas de instalação e manutenção se situam nas proximidades da usina? Que know-how têm os empregados e parceiros a respeito do preparo e carregamento de substrato, e dos equipamentos de transporte e silagem?
Objetivos da 6ª etapa	- Selecionar os componentes conforme o atual estado da arte e buscando materiais de alta qualidade, com ótimo nível de serviços e automatização da empresa.

11.2.5 Utilização de gás

Conforme as especificações do local e a destinação final do gás planejada, deve-se decidir sobre o tipo de aproveitamento energético do biogás gerado (cf. capítulo 6). A checklist a seguir contém pontos sobre a utilização do gás em um projeto de biogás (7ª etapa).

7ª etapa: Utilização de gás	
Tipo de utilização do gás	Que possibilidades há de aproveitar eficientemente o vetor energético gerado no local? - Geração de energia elétrica e calor no processo de cogeração (p. ex. usina de cogeração, microturbina a gás, etc.) - Geração de frio por processo de energia, calor e frio - Tratamento do biogás (desumidificação e dessulfurização) visando qualidade de gás natural, para a injeção na rede de gás natural pública ou microrredes de gás - Tratamento para obter combustível para veículos motorizados - Biogás como fonte de energia térmica
Objetivos da 7ª etapa:	- Escolher a utilização energética do biogás



11.2.6 Avaliação e tomada de decisão

A avaliação e tomada de decisão de um projeto de biogás se dá conforme a viabilidade econômica e o tipo de financiamento (cf. capítulo 8.2). A respectiva checklist se encontra na 8ª etapa: Avaliação e tomada de decisão.

8ª etapa: Avaliação e tomada de decisão	
Criação de um plano de custos detalhado	<p>Com base na estipulação dos processos, é possível traçar um planejamento detalhado dos custos.</p> <p>O plano de custos deve ser elaborado de forma que permita um controle dos custos a qualquer tempo.</p> <p>Os itens de custos devem ser divididos nos seguintes blocos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Custos dos componentes separados - Custos do substrato "entregue no biodigestor" - Amortização - Conservação, manutenção e reparos - Juros - Seguros - Custos salariais - Custos de financiamento e licenciamento - Custos de planejamento - Custos da empresa de fornecimento de energia, custos de conexão à rede - Custos de transporte, se houver - Custos gerais (telefone, escritórios, abastecimento, etc.) <p>Os custos de cada componente devem ser subdivididos. No caso de prestação própria ou contratação de determinados trabalhos especializados, indicar detalhadamente o respectivo custo.</p>
Subsídios	<p>Além do Programa de Incentivo ao Mercado e do empréstimo a juros baixos concedido pelo KfW, a instituição alemã de crédito para a reconstrução, há diferentes programas de subsídio oferecidos pelos Estados alemães.</p> <p>Com quais órgãos que concedem subsídios devo entrar em contato?</p> <p>Quais são os pré-requisitos para solicitar ou ter direito a subsídios?</p> <p>Quais são os prazos a serem cumpridos?</p> <p>Qual é a documentação necessária?</p>
Financiamento	<p>Deve-se determinar o valor a ser financiado por terceiros. Deve-se procurar orientação prestada pelas instituições financeiras e os conceitos de financiamento devem ser examinados cuidadosamente em relação à situação da empresa. Os pacotes de financiamento devem ser comparados.</p>
Objetivos da 8ª etapa:	<ul style="list-style-type: none"> - Elaborar uma análise de rentabilidade, considerando o peso de vantagens extras (p. ex. odor, fluidez do esterco para biogás, etc.) <p>Consequência: conforme o caso, contatar usinas (vizinhas) para</p> <ul style="list-style-type: none"> - adquirir quantidades adicionais de substrato, - Fundar cooperativa de operadores de usinas <p>→ Nova análise de rentabilidade como documento para a tomada de decisões</p>



11.3 Fontes bibliográficas

- [11-1] Görisch, U., Helm M. : Biogasanlagen; Ulmer Verlag, 2006
- [11-2] FNR (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, 2009
- [11-3] Müller-Langer, F.: Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen Energiesystem, FNR, 2009
- [11-4] BMU: Nutzung von Biomasse in Kommunen - Ein Leitfaden, 2003
- [11-5] AGFW Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. bei der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V. (Hrsg.): Wärmemessung und Wärmeabrechnung. VWEW- Verlag, Frankfurt a. Main 1991
- [11-6] Technische Information 4, Sicherheitsregeln für Biogasanlagen; Bundesverband der landw. Berufsgenossenschaften e.V.; Kassel 2008
- BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)
- BioabfallV: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV)
- BiomasseV: Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV)
- DIN EN ISO 10628: Fließschemata für verfahrenstechnische Anlagen - Allgemeine Regeln (ISO 10628:1997); Deutsche Fassung EN ISO 10628:2000
- Düngegesetz (DünG): Düngegesetz
- Düngemittelverordnung: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV)
- Düngeverordnung: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV)
- Diretiva da UE 1774: Orientações para a aplicação do novo Regulamento (CE) n.º 1774/2002 relativo aos subprodutos animais
- Landesabfallgesetz: Landesrechtliche Regelung der Bundesländer zur Erfassung und Verwertung organischer Abfälle
- Landeswassergesetz: Landesrechtliche Regelungen der Bundesländer zum Wassergesetz – Landeswassergesetz – LWG
- TA Lärm: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz)
- TA Luft: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft (Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz)
- UVPG: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
- VOB: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
- RE CE n.º 1774/2002: Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho, de 3 de outubro de 2002, que estabelece regras sanitárias relativas aos subprodutos animais não destinados ao consumo humano
- Wasserhaushaltsgesetz: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz– WHG)





12 Importância do Biogás como Fonte de Energia Renovável na Alemanha

Há mais de três décadas, as discussões sobre energia e meio ambiente na Alemanha vêm sendo norteadas principalmente pelos efeitos do uso da energia sobre o clima. O grande empenho da Alemanha em intensificar a adoção de fontes de energia renováveis já contribuiu substancialmente para a redução das emissões de gases do efeito estufa. É nesse contexto que o fornecimento e uso do biogás, particularmente como fonte geradora de eletricidade, têm dado uma grande contribuição.

Desde que a EEG entrou em vigor no ano 2000, houve um importante crescimento da geração e uso do biogás, principalmente na agricultura. Esse avanço foi promovido pelo Programa de Incentivo ao Mercado (MAP), mantido pelo governo alemão, e por diversos programas de fomento ao investimento em nível estadual. A alteração da EEG, em 2004, teve um papel fundamental na aceleração da construção de novas usinas. Desde então, o uso de culturas energéticas para a produção de biogás tem sido atraente do ponto de vista econômico. A consequência é que hoje em dia o potencial de geração e utilização do biogás já vem sendo muito explorado. Apesar disso, ainda há um grande potencial oferecido por fluxos de materiais orgânicos para a geração de biogás. Com isso, estão estabelecidas as bases que apontam para um rápido aumento na geração e utilização do biogás.

12.1 Geração de biogás como opção de aproveitamento energético da biomassa

A biomassa é a matéria de origem orgânica que pode ser utilizada para gerar energia. A biomassa é, portanto, a massa de origem animal ou vegetal e os respectivos resíduos (p. ex. dejetos). Também fazem parte

do grupo das biomassas os restos e resíduos orgânicos, tais como palha, resíduos de abatedouros, etc.

Em linhas gerais, as fontes de biomassa se dividem em cultivos energéticos, resíduos de colheitas, subprodutos e resíduos orgânicos. Mais detalhes se encontram no capítulo 4 "Descrição de substratos selecionados". Antes de serem destinados à produção de energia, esses fluxos de materiais primeiro têm de ser disponibilizados. Geralmente, é necessário que sejam transportados. Em muitos casos, antes de ter o seu potencial energético aproveitado, a biomassa precisa ser processada mecanicamente. Frequentemente a biomassa é armazenada para que sua geração e sua demanda possam ser harmonizadas (Figura 12.1).

Em seguida, é possível disponibilizar energia elétrica, térmica e/ou combustível a partir da biomassa. Isso é conseguido com diversas tecnologias à disposição. Uma delas é a combustão direta em equipamentos para essa finalidade, com os quais também é possível realizar a cogeração de calor e eletricidade. O fornecimento de calor a partir de vetores energéticos sólidos é a típica aplicação da disponibilização de energia final/útil a partir da biomassa.

Além disso, existem várias outras tecnologias e processos que permitem tornar a biomassa disponível para atender à demanda de energia final/útil (Figura 12.1), classificados em processos de enriquecimento térmicos, físicos e bioquímicos. A geração de biogás (decomposição anaeróbia dos substratos em biogás) e sua utilização constituem uma das opções de enriquecimento por processos bioquímicos.

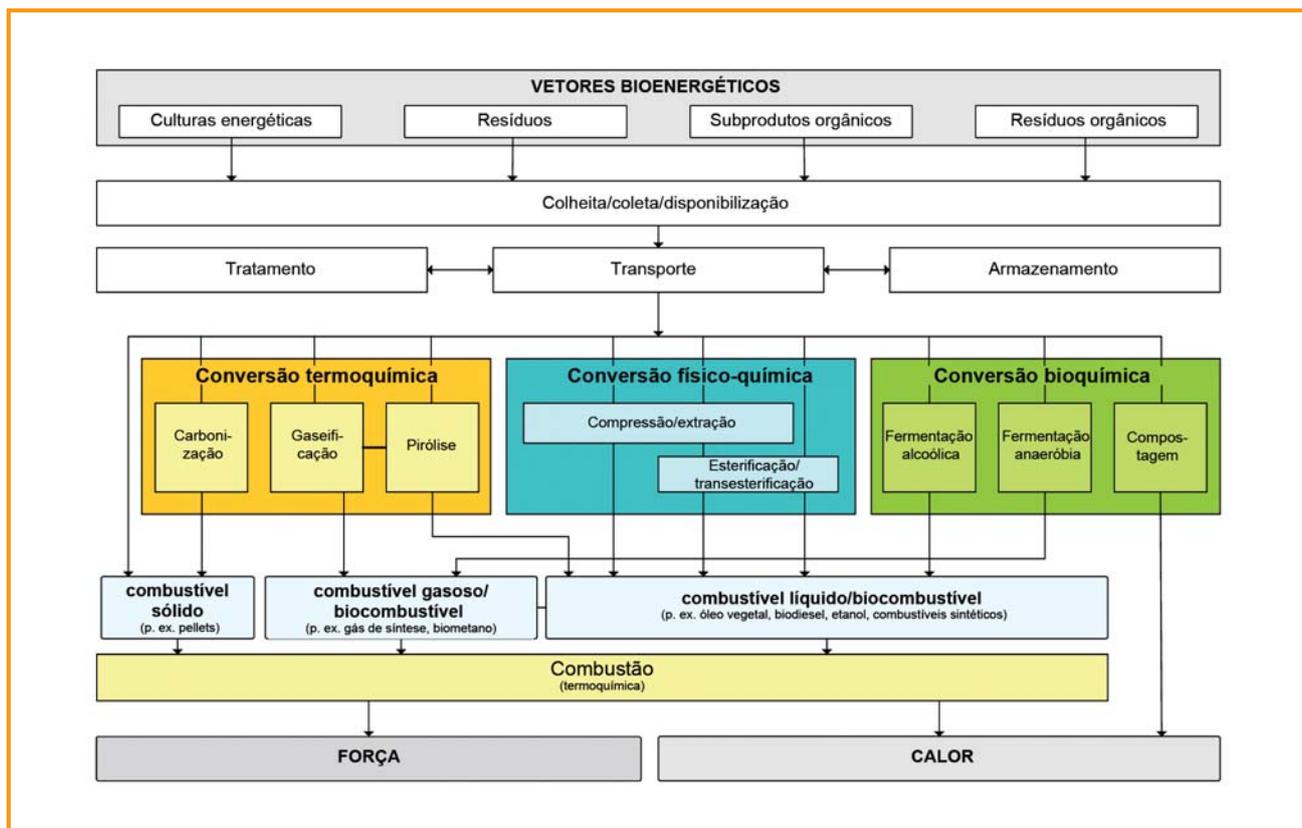


Figura 12.1: Opções de uso da biomassa para disponibilizar energia final/útil

12.2 Importância ecológica e sustentabilidade da geração e aproveitamento do biogás

Vários projetos de pesquisa e avaliação estão sendo conduzidos para investigar a importância ecológica da geração e utilização do biogás. Os resultados de alguns desses trabalhos já foram publicados. De forma geral, pode-se constatar que a sustentabilidade é principalmente condicionada pelos seguintes fatores: escolha do substrato, qualidade (eficiência e emissões) da tecnologia da usina e eficiência do uso do biogás gerado.

Em relação ao tipo de substrato, são considerados vantajosos ao meio ambiente aqueles que não implicam custos extras, razão pela qual o uso desses substratos deve ser incentivado. Um exemplo é o esterco líquido: seu uso para gerar biogás não apenas racionaliza o aproveitamento da biomassa disponível, mas também evita as emissões que ocorreriam em seu armazenamento convencional. Por isso, em vez de utilizar culturas energéticas, deve-se privilegiar principalmente as misturas de resíduos e restos orgânicos (p. ex. dejetos animais, resíduos da indústria alimentícia). Do ponto de vista ecológico, os resíduos e restos

orgânicos também podem ser um bom complemento à digestão de biomassas dedicadas.

Quanto à tecnologia da usina, deve-se dar grande importância a que emissões sejam evitadas e a altos níveis de eficiência, ou seja, um elevado grau de degradação da biomassa. Isso é possibilitado não apenas por medidas construtivas no momento do investimento inicial, mas também pelo correto modo de operação da usina. Indicações e considerações detalhadas podem ser obtidas, por exemplo, nos relatórios do projeto "Otimização da ampliação sustentável da geração e uso do biogás na Alemanha" [12-1].

No que toca ao aproveitamento do biogás, os melhores conceitos são aqueles que utilizam o máximo possível da energia contida no biogás e são capazes de substituir os vetores energéticos que produzem elevados níveis de CO₂, tais como o carvão e o petróleo. Portanto, as estratégias que realizam a cogeração de calor e eletricidade, aproveitando o máximo possível do calor, são geralmente mais vantajosas que as demais opções. O aproveitamento do calor deve também substituir ao máximo os vetores energéticos fósseis usados como fonte de calor. Especialmente em grandes usinas, caso em que esse aproveitamento não é viável, p. ex., em função da localização desfavorável da

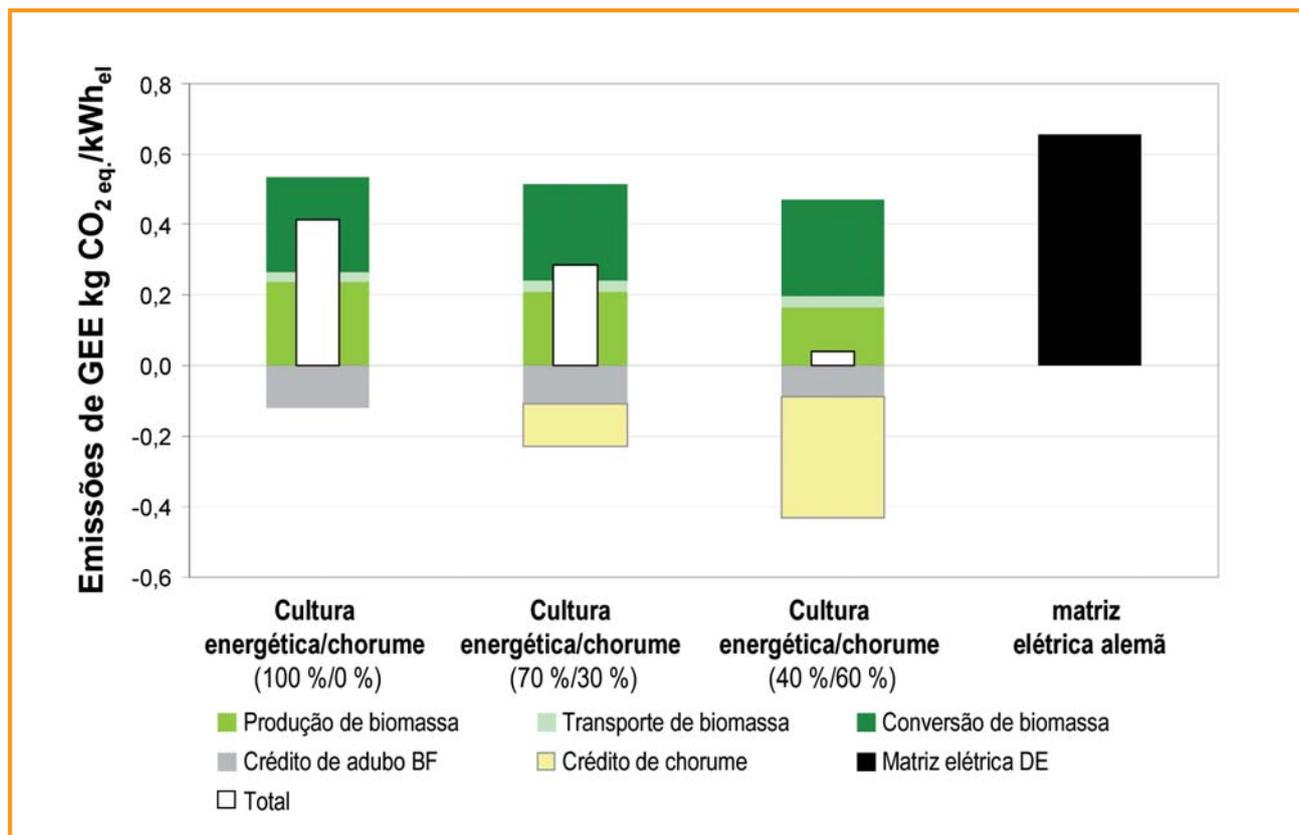


Figura 12.2: Emissões de gases do efeito estufa ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{el}}$) de usinas-modelo de biogás em comparação com a matriz elétrica alemã. (BF = biofertilizante) [12-5]

usina, uma possibilidade de melhorar os efeitos ambientais é o tratamento do biogás para obter qualidade de gás natural e a canalização para um local com alta demanda de calor o ano todo, no qual é então realizada a conversão.

A Figura 12.2 mostra as emissões dos gases do efeito estufa (emissões de GEE) procedentes da geração de energia elétrica com biogás de diversas usinas, em comparação com as emissões de gases do efeito estufa da matriz elétrica alemã (2005) [12-5]. Esse cálculo considera usinas-modelo de biogás para as quais se assumiu unicamente o uso de culturas energéticas, ou a combinação de culturas energéticas e esterco líquido, como combustível da usina. As emissões de gases do efeito estufa são indicadas em equivalente de dióxido de carbono por quilowatt-hora elétrico. O cultivo de espécies energéticas está normalmente associado a emissões adicionais (p. ex. óxido nitroso, amônia) com impacto sobre o clima, sendo que, para o uso de esterco com finalidade energética em usinas, o cálculo deduz emissões não realizadas. Portanto, deve-se primeiro esgotar o potencial de rentabilidade proporcionado por dejetos animais e resíduos vegetais da agricultura. Devido aos créditos concedidos pelas emissões não realizadas na digestão de esterco,

em oposição ao armazenamento de esterco não tratado, as emissões de gases do efeito estufa se reduzem à medida que a fração de esterco aumenta, em comparação com a matriz elétrica alemã. Além de emitir menos gases do efeito estufa em comparação com o armazenamento convencional (ou seja, não usado em usinas), o esterco tem também um efeito estabilizador de processos [12-1]. Como os biofertilizantes são um substituto da adubação mineral, dão direito aos créditos de adubos, uma vez que têm o mesmo efeito positivo sobre o balanço de gases do efeito estufa.

Os resultados mostram que, de forma geral, é possível evitar as emissões de gases do efeito estufa com o auxílio da produção de eletricidade a partir do biogás, pela substituição de vetores energéticos convencionais (na Alemanha, em grande parte energia nuclear e energia de lignito/carvão betuminoso). Isso depende fundamentalmente da operação da usina de biogás.

No que diz respeito à avaliação dos dados calculados relativos ao balanço ecológico, constata-se que as fontes de dados dos cálculos são frequentemente caracterizadas por elevado grau de incerteza, o que inviabiliza a sua aplicação prática. Além disso, de forma geral os dados absolutos calculados não são determi-

nantes. Em lugar deles, a avaliação deve tomar por base as diferenças entre as diversas opções de geração e uso de biogás e compará-las. Medições atualmente realizadas em usinas de biogás modernas, porém, estão melhorando sensivelmente a qualidade da base de dados, de forma que no futuro essas estimativas serão bem mais confiáveis.

12.3 Situação atual da geração e aproveitamento do biogás na Alemanha

A exposição a seguir registra a situação da geração e aproveitamento do biogás na Alemanha em março de 2010. As descrições se referem a usinas de biogás sem equipamento de tratamento de gás e locais de aterro.

12.3.1 Parque de usinas e potências

Desde que a Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG) entrou em vigor, o número de usinas de biogás na Alemanha vem aumentando em ritmo crescente. Isso faz da EEG um bem-sucedido instrumento no setor de biogás. Essa evolução positiva foi principalmente graças ao alicerce básico confiável e de longo prazo que se estabeleceu. Especial importância teve a alteração da EEG em 2004, que incluiu o subsídio à adoção de culturas energéticas na operação de usinas de biogás. Como se pode ver na Figura 12.3, desde então registrou-se uma grande ampliação do parque de usinas, acompanhada do aumento da potência elétrica instalada. O aumento do uso de culturas energéticas permitiu o aumento da potência média das usinas. No fim de 2008, a potência média de uma usina de biogás era de aproximadamente 350 kW_{el} (cf. ano 2004: 123 kW_{el} [12-3]). Até o fim de 2009, a potência média das usinas alemãs havia aumentado para 379 kW_{el} [12-7]. Em contraponto às novas usinas construídas antes da nova versão da EEG de 2009, a construção de novas usinas nesse ano se deslocou para a faixa de potência < 500 kW_{el}. Novas usinas situam-se preferencialmente na faixa de potência entre 190 e 380 kW_{el}.

Em fins de 2009, o parque contava com cerca de 4.900 usinas de biogás com potência elétrica instalada de aproximadamente 1.850 MW_{el}. Em comparação com o modesto número de novas usinas construídas em 2008, o ano de 2009 registrou 900 novas usinas cuja potência instalada totalizou cerca de 415 MW_{el}, o que representa um aumento considerável de novas unida-

des. Isso se deve particularmente à nova edição da EEG em 2009 e ao significativo aumento das taxas de remuneração da eletricidade gerada a partir do biogás. Observa-se, assim, uma evolução muito parecida com aquela ocorrida após a alteração da EEG em 2004. Para o ano de 2009, a geração de eletricidade potencial a partir do biogás foi estimada em cerca de 13,2 TWh_{el}¹ [12-3]. Considerando as novas usinas construídas ao longo de 2009, a geração real de eletricidade com biogás deve ser inferior, tendo um valor estimado de cerca de 11,7 TWh_{el}² [12-3]. Isso corresponde a cerca de 2% do total bruto de geração elétrica na Alemanha, segundo estimativas preliminares de 594,3 TWh_{el} [12-2] para o ano de 2009.

A tabela 12-1 exibe, para todos os Estados alemães, o número de usinas de biogás operando na Alemanha, bem como a potência média elétrica instalada por usina no final de 2009. Os dados se baseiam na pesquisa conduzida pelos ministérios do meio ambiente e agricultura, das câmaras de agricultura e dos órgãos competentes do setor agrícola nos respectivos Estados.

A elevada potência elétrica média de Hamburgo se deve à usina de processamento de resíduos orgânicos instalada na cidade, com potência de 1 MW_{el}. As cidades-estado Berlim e Bremen não dispõem de usinas de biogás, contando apenas com estações de tratamento e utilização de gás.

A figura 12-4 mostra a potência elétrica instalada relativa à área cultivada [kW_{el}/1000 ha] em cada um dos Estados alemães.

Adicionalmente, no fim de 2009 havia em operação cerca de 31 usinas para injeção de biogás na rede de gás natural, somando uma potência de gás instalada de aproximadamente 200 MW. A injeção de gás efetiva na rede de distribuição de gás foi estimada, para o ano de 2009, em cerca de 1,24 TWh, pois tiveram de ser considerados diferentes momentos de entrada em operação e níveis de carga. Além disso, em alguns locais, em vez de ser injetado na rede de gás natural, o biogás foi convertido em eletricidade in loco, ou, no caso de uma usina de biogás, usado diretamente como combustível para veículos. Espera-se que outras usinas entrem em operação.

1. A geração de eletricidade potencial foi calculada com base em um tempo de serviço médio em plena carga de 7.500 horas por ano, não considerado o momento da entrada em operação de novas usinas.
2. A estimativa da geração real de eletricidade a partir do biogás se baseou nas seguintes suposições: 7.000 horas de plena carga para o parque de usinas até o fim de 2008, 5.000 horas para novas usinas do 1º semestre de 2009, 1.600 horas para o 2º semestre.

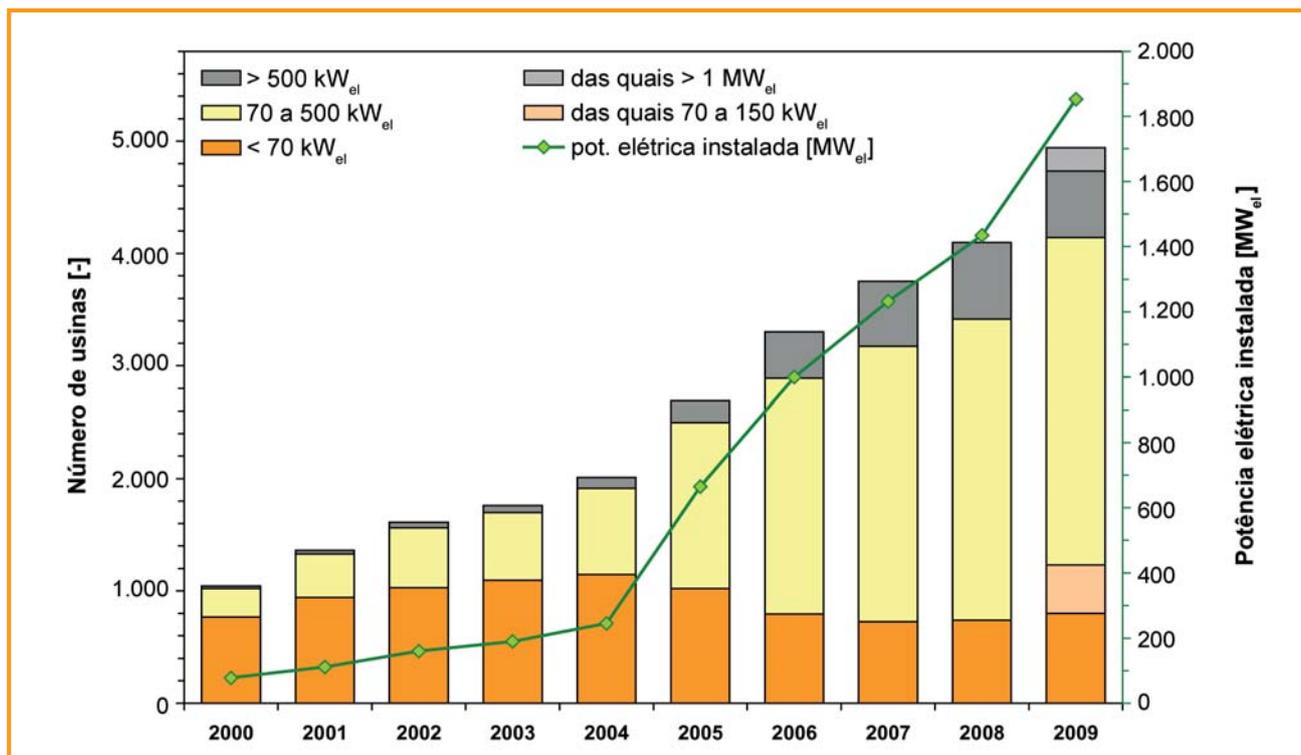


Figura 12.3: Evolução das usinas de biogás na Alemanha até 2009 (número de usinas classificadas conforme a potência elétrica instalada MW_{el}) [12-3]

Tabela 12.1: Distribuição regional das usinas de biogás em operação no ano de 2009 e potência elétrica instalada na Alemanha (pesquisa das instituições dos Estados em 2010) [12-3]

Estado	Usinas de biogás em operação [número]	Potência total instalada [MW _{el}]	Potência média por usina [kW _{el}]
Baden-Württemberg	612	161,8	264
Baviera	1.691	424,1	251
Berlim	0	0	0
Brandemburgo	176	112,0	636
Bremen	0	0	0
Hamburgo	1	1,0	1.000
Hesse	97	34,0	351
Mecklemburgo-Pomerânia Ocidental ^a	156 (215)	116,9	544
Baixa Saxônia	900	465,0	517
Renânia do Norte-Vestfália	329	126,0	379
Renânia-Palatinado	98	38,5	393
Sarre	9	3,5	414
Saxônia	167	64,8	388
Saxônia-Anhalt	178	113,1	635
Schleswig-Holstein	275	125,0	454
Turingia	140	70,3	464
Total	4.888	1.853	379

a. Dados de locais operacionais, sendo que agrupamentos de usinas foram interpretados como um local operacional devido à metodologia do levantamento de dados adotada. Dados entre parênteses: estimativa do número de usinas de biogás.

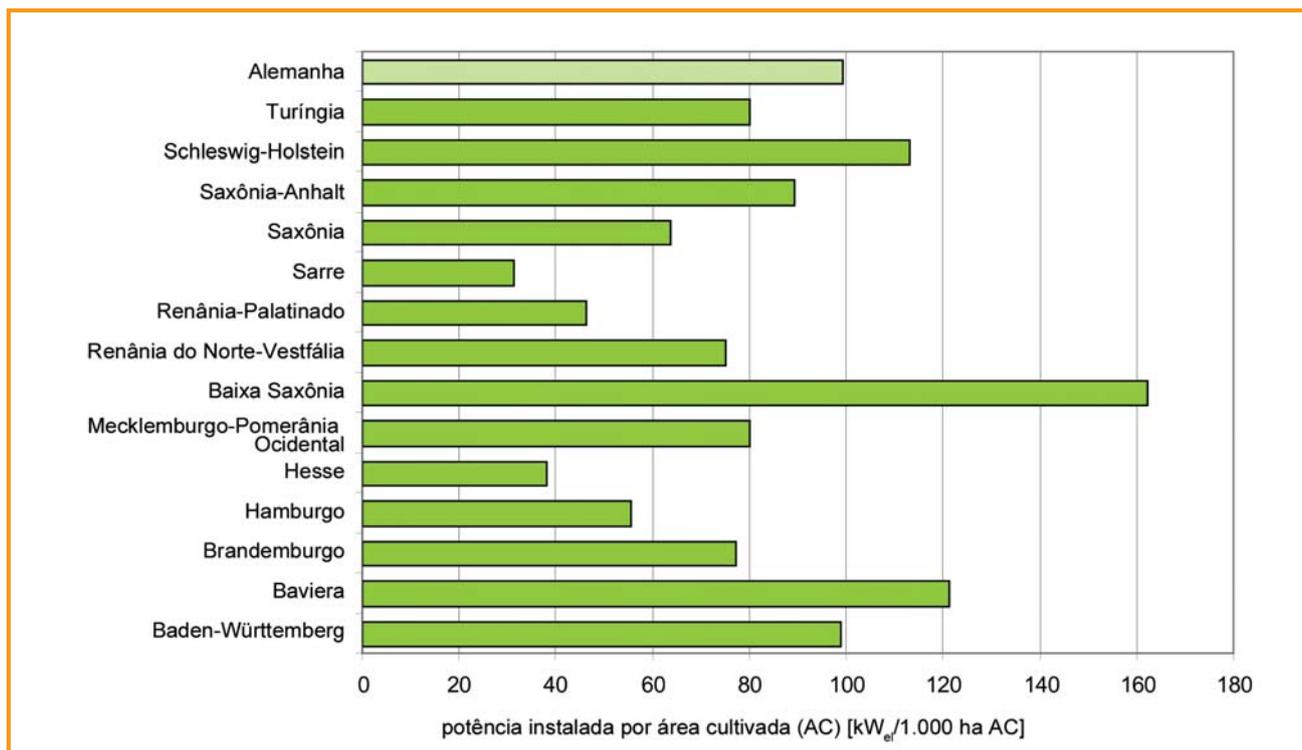


Figura 12.4: Potência elétrica instalada relativa à área cultivada [kW_{el}/1.000 ha de área cultivada] nos Estados alemães (dados obtidos em [12-3], [12-6])

12.3.2 Aplicações do biogás e tendências

A alteração da EEG em 2009 representou um forte incentivo para a ampliação da capacidade de biogás na Alemanha. Em função da estrutura de remuneração da EEG, espera-se que novamente haja uma forte tendência à construção de pequenas usinas (< 150 kW_{el}), apesar de grandes usinas continuarem a ser construídas. A geração de eletricidade a partir do biogás, após a transferência pela rede de gás natural, continuará tendo um papel de destaque.

No que se refere à eficiência energética e econômica de usinas de biogás para a geração de energia elétrica, terá importância cada vez maior a utilização racional e tão intensa quanto possível do calor de unidades de cogeração. Nos casos em que um potencial consumidor do calor não se encontre próximo ao local da usina, é possível instalar a unidade de cogeração próximo ao local de utilização do calor. A usina de cogeração pode ser abastecida com biogás tratado a qualidade de gás natural (p. ex. separação do dióxido de carbono), pela rede de gás natural, ou por meio de microrredes de biogás desumidificado e dessulfurizado.

Assim, o tratamento do biogás para elevar a sua qualidade visando a injeção na rede de gás natural de-

verá continuar ganhando força. O biometano disponível, além de fonte para a geração de eletricidade, terá um importante papel também no fornecimento de calor e como fonte de combustível para motores e veículos. Essa flexibilidade de opções de aproveitamento são uma grande vantagem do biometano em relação aos demais vetores energéticos. No campo do fornecimento de energia térmica, a evolução dependerá principalmente da disposição do consumidor em optar pelo biometano, o qual tem custo superior ao do gás natural, ou de futuras alterações na legislação (exceção são as estações de tratamento de efluentes, que são relativamente pequenas e cujo biogás é utilizado para fornecer calor a processos industriais). No tocante ao uso como combustível, as expectativas estão baseadas no compromisso do setor alemão de substituir 10% do gás natural combustível por biometano até 2010 e 20% até 2020.

12.3.3 Substratos utilizados

Atualmente, na Alemanha são utilizados predominantemente dejetos animais e matéria-prima de culturas energéticas como substrato básico. A figura 12.5 [12-3] mostra os resultados de uma pesquisa realizada

em 2009 entre operadores de usinas. Na pesquisa, foram compilados os dados de 420 questionários sobre o substrato utilizado (matéria fresca) e sua quantidade em massa. Conforme a pesquisa, 43% da massa de substrato utilizado é proveniente de dejetos animais, 41% de culturas energéticas e cerca de 10% de resíduos orgânicos. Em função de diferentes regulamentos na Alemanha, os resíduos orgânicos são tratados principalmente em usinas de digestão de resíduos especializadas. Os resíduos agrícolas e industriais, com cerca de 6%, representam a menor parte do substrato utilizado. O uso de resíduos agrícolas não aumentou como esperado, apesar de as novas regras da EEG, introduzidas em 2009, permitirem o uso de resíduos agrícolas selecionados (cf. EEG 2009, Anexo 2, V) em usinas de biogás sem que isso signifique a perda do bônus NawaRo.

Do ponto de vista do conteúdo energético, as culturas energéticas são atualmente o tipo de substrato dominante na Alemanha. Com isso, a Alemanha é um dos poucos países europeus a obter o biogás primariamente de fontes que não os aterros e estações de tratamento de efluentes (tais como usinas agrícolas descentralizadas) [12-4] (ano de referência: 2007).

As culturas energéticas são utilizadas em 91% de todas as usinas de biogás agrícolas [12-3]. Embora a silagem de milho seja a biomassa predominante no mercado (ver também figura 12.6), quase todas as usinas de biogás utilizam simultaneamente várias culturas energéticas, p. ex. silagem de planta inteira de cereal, silagem de gramíneas ou grãos de cereais.

Desde 2004, cada vez mais usinas têm usado unicamente culturas energéticas, sem dejetos animais ou qualquer tipo de cossustrato. Graças ao uso de substâncias que auxiliam na fermentação, como p. ex. misturas de micronutrientes, agora é possível operar uma usina com estabilidade, do ponto de vista microbiológico.

Os detalhes dos diversos substratos se encontram no capítulo 4, "Descrição de substratos selecionados".

12.4 Potencialidades

A identificação do potencial presente e do prognóstico da geração de biogás depende de diversos fatores. Na área da agricultura, os potenciais são dependentes, entre outros fatores, das condições econômicas, o perfil de culturas agrícolas e das condições de alimentação no contexto mundial. Assim, os diferentes concorrentes da biomassa na agricultura atuam em duas frentes: na produção de alimentos, inclusive ração ani-

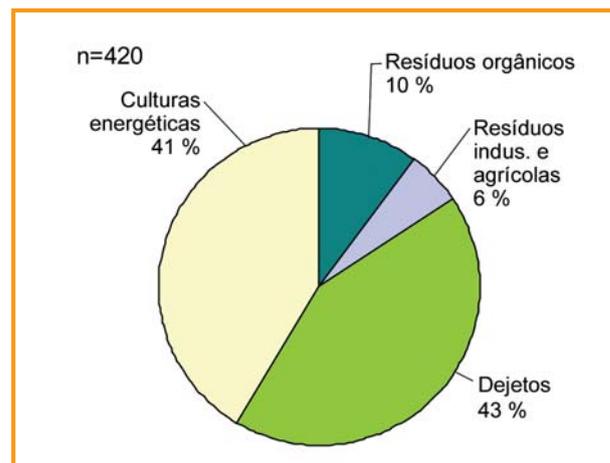


Figura 12.5: Uso de substrato em usinas de biogás, valores baseados em massa (pesquisa entre operadores de usinas em 2009) [12-3]

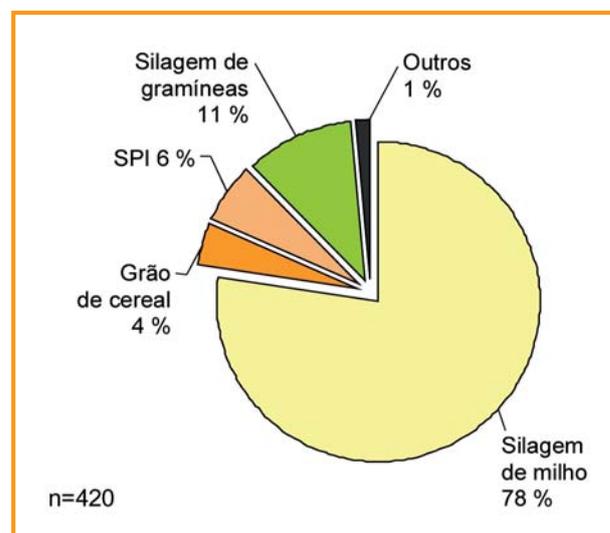


Figura 12.6: Uso de substrato de culturas energéticas em usinas de biogás, valores baseados em massa (pesquisa entre operadores de usinas em 2009) [12-3]

mal, e no aproveitamento da matéria-prima para fins energéticos. No segundo grupo, por sua vez, disputam diferentes vias de conversão energética. No caso de resíduos agrícolas, urbanos e industriais, pode-se escolher entre os mais variados canais de utilização energética e de matéria-prima. Por isso, independentemente dos prognósticos traçados, podem-se obter os mais diversos resultados.

12.4.1 Potencial técnico de energia primária

O biogás pode ser gerado a partir de uma série de fluxos de materiais diferentes. A seguir, são expostos,

para as diferentes frações utilizáveis de biomassa, os potenciais técnicos de energia primária de diferentes fluxos de material analisados, bem como os respectivos potenciais técnicos de geração de energia (fornecimento possível de calor e eletricidade) e de energia final¹ (energia final que pode ser utilizada no sistema energético). Os substratos foram subdivididos nos grupos seguintes:

- Resíduos urbanos
- Resíduos industriais
- Resíduos de colheitas e dejetos animais
- Culturas energéticas: cultivo em cerca de 0,55 mi ha na Alemanha (2007), para a geração de biogás como potencial mínimo
- Culturas energéticas: cultivo em cerca de 1,15 mi ha na Alemanha (2007), ou 1,6 mi ha (2020), para a geração de biogás como potencial máximo.

Para a Alemanha, é calculado um potencial técnico de energia primária de 47 PJ/a para o biogás gerado a partir de resíduos urbanos, e de 13 PJ/a para aquele gerado a partir de resíduos industriais (Figura 12.7). Indiscutivelmente, os maiores potenciais, tanto hoje como no futuro, se encontram no setor agrícola (entre outros, nos resíduos de colheitas e dejetos animais), apesar da tendência prevista de ligeira queda de 114 PJ/a em 2007 para 105 PJ/a em 2020. Variações bem maiores do potencial de biogás podem ser observadas nas culturas energéticas, pois as áreas disponíveis para a cultura de plantas energéticas podem ser disputadas por outras opções de utilização. Por isso, para o potencial de biogás a partir de culturas energéticas são indicados valores mínimo e máximo.

Em 2007 na Alemanha, as matérias-primas cultivadas com a finalidade única de gerar energia respondiam por um potencial técnico de energia primária de 86 PJ/a, ocupando uma área plantada de 0,55 mi ha somente para a geração de biogás². Assumindo que para

a geração de biogás estariam disponíveis no máximo 1,15 mi ha, esse potencial aumenta para 102 PJ/a em 2007.

Supondo que em 2020 cerca de 1,6 mi ha de áreas cultiváveis estarão disponíveis para produzir biogás e se considere um aumento anual da produção de 2%, estima-se que o potencial técnico de energia primária de culturas energéticas para o biogás será de ao todo 338 PJ/a.

Com relação ao potencial de biogás explorado, assume-se que em 2007 aproximadamente 108 PJ sejam utilizados para a produção do gás. Isso corresponde a aproximadamente 42% do potencial de biogás prognosticado no caso de uso mínimo de culturas energéticas (0,55 mi ha), ou de cerca de 30% no caso do uso máximo (1,15 mi ha).

12.4.2 Potencial técnico de energia final

O potencial de geração mencionado pode ser convertido em calor e/ou eletricidade. Os potenciais de geração a seguir descrevem a quantidade de calor que pode ser fornecida e a eletricidade que pode ser produzida (sem considerar restrições condicionadas à demanda) e os potenciais de energia final (considerando tais restrições). Estes potenciais de energia final são os que melhor representam a contribuição da geração e utilização de biogás para cobrir a demanda de energia final e útil.

12.4.2.1 Geração de energia elétrica

Com base em um grau de eficiência de 38% relativo à conversão em eletricidade por motores em usinas de cogeração, é calculado do potencial de geração uma produção potencial de eletricidade e , com ela, o potencial técnico de energia final de no máximo 137 PJ/a para o ano de 2007. Tomando-se para 2020 uma eficiência elétrica média de 40%, é possível, baseado em estimativas de hoje, atingir um potencial técnico de energia final de no máximo 201 PJ/a.

12.4.2.2 Fornecimento de calor

Considerando que o fornecimento exclusivo de calor atinja uma eficiência de conversão de 90%, calcula-se uma produção potencial de calor e de energia final, para 2007, de 325 PJ/a. Se, por outro lado, o cálculo partir do uso exclusivo em usinas de cogeração para a produção combinada de eletricidade e calor, e de uma eficiência térmica de 50%, obtém-se um potencial técnico de energia final para o calor de 181 PJ/a em 2007.

1. O potencial técnico de energias renováveis representa a parte do potencial teórico útil, considerando as restrições técnicas existentes. São consideradas também as restrições estruturais e ecológicas (p. ex. reservas naturais e áreas para a integração de biótopos planejada na Alemanha) e disposições legais (p. ex. a legalidade do uso de resíduos orgânicos críticos do ponto de vista sanitário), uma vez que elas, a exemplo das limitações unicamente técnicas, frequentemente são intransponíveis. Em relação ao seu valor de referência, a energia pode ser classificada em

- potencial técnico de energia primária (p. ex. para a geração de biogás a partir de biomassas disponíveis),
- potencial técnico de geração de energia (p. ex. biogás na saída de uma usina de biogás),
- potencial técnico de energia final (p. ex. energia elétrica de usinas de biogás que chega ao consumidor final) e
- potencial técnico de energia útil (p. ex. energia do ar quente de um secador de cabelos alimentado com energia elétrica proveniente de uma usina de biogás).

2. A título de simplificação, o cálculo do potencial de biogás com culturas energéticas pressupõe o cultivo das áreas com milho. Na prática, as usinas de biogás utilizam um mix de culturas energéticas (cf. capítulo 12.3.3); a proporção do milho é de 80% do total de culturas energéticas em usinas de biogás (com base na MF).

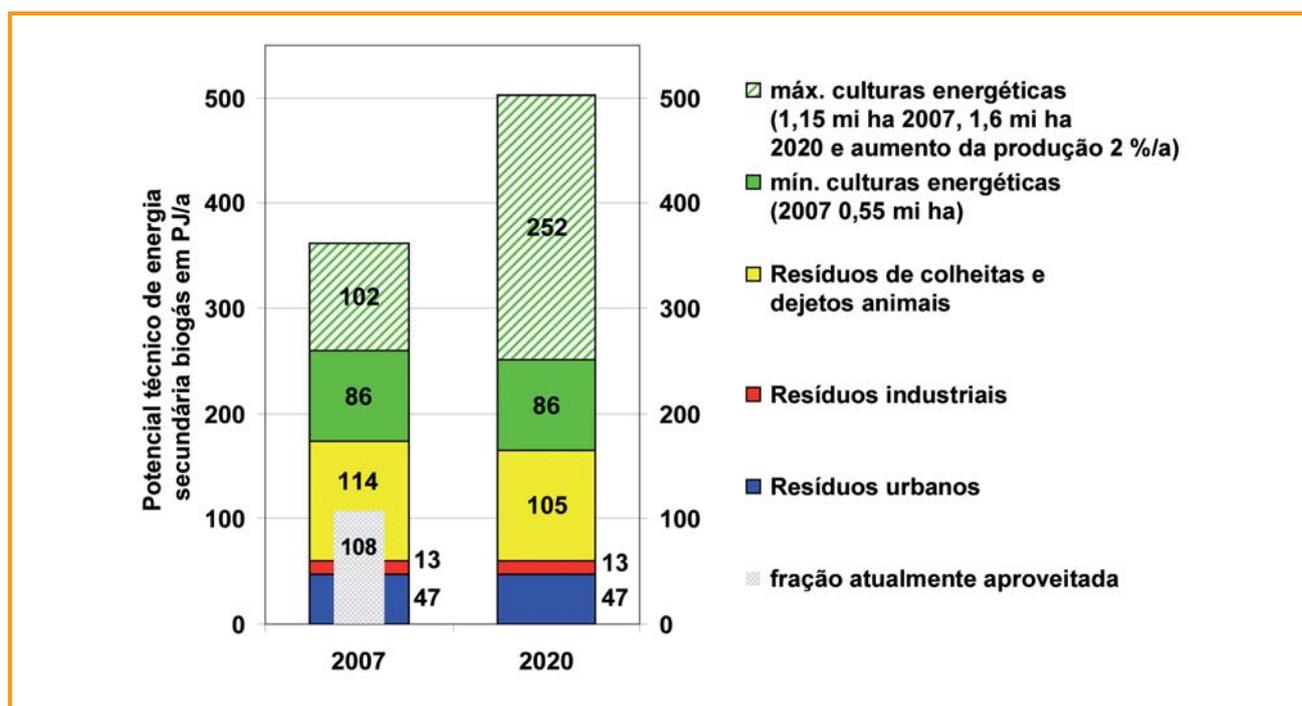


Figura 12.7: Potencial técnico de energia primária para biogás na Alemanha 2007 e 2020

12.5 Conclusões

Os potenciais técnicos da geração de biogás na Alemanha, relativos sobretudo ao setor agrícola, continuam a ter um papel preponderante do ponto de vista da economia energética. Embora o forte crescimento do setor de geração e utilização de biogás tenha ocasionado uma notável redução dos potenciais disponíveis, dificultando a busca por locais para a implantação de novas usinas, no panorama geral o setor agrícola ainda continua oferecendo espaço para a expansão da utilização do biogás. Em função dos incentivos que a EEG vem proporcionando para o aproveitamento do calor residual, a utilização do biogás como vetor energético tem se intensificado substancialmente nos últimos anos: hoje, além da energia elétrica, mais de um terço da energia térmica produzida contribui para substituir vetores energéticos fósseis. Esse é o caso sobretudo em novas usinas, que quase sem exceção são construídas incluindo um abrangente conceito de aproveitamento da energia térmica. As usinas antigas, porém, ainda oferecem um importante potencial de aproveitamento futuro do calor residual ainda não explorado.

A tecnologia adotada pelas usinas para esgotar o potencial energético já atingiu um ótimo padrão, acompanhando o aumento no rigor dos requisitos do licenciamento. Com frequência, o seu alto nível é com-

parável ao de equipamentos industriais de outros ramos. Os sistemas se tornaram muito mais confiáveis e seguros. O aumento dos casos de acidente em usinas, noticiados regularmente pela imprensa, se explica pelo grande aumento de usinas na Alemanha, e em casos isolados devido à usina não satisfazer as exigências técnicas em sua construção. A maioria dos componentes de sistemas, porém, ainda oferece potencial de aprimoramento, sobretudo no que tange à eficiência da usina.

Fundamentalmente, a geração e utilização do biogás representam um canal extremamente vantajoso e ecológico de disponibilização de energia quando em comparação com vetores energéticos fósseis. Essa vantagem se faz notar principalmente quando, na geração do biogás, se utilizam resíduos que não exigem custos adicionais de preparo. Dessa perspectiva, vale destacar que o biogás é um vetor energético que propicia um aproveitamento eficiente e o mais completo possível.

Nos últimos dez anos, a Alemanha foi capaz de quintuplicar o seu parque de usinas de biogás. A potência total das usinas cresceu de 45 MW_{el} (1999) para 1.853 MW_{el} (fins de 2009). Por usina, a potência elétrica instalada média aumentou de 53 para 379 kW_{el}. A previsão é a de que essa tendência prossiga, ainda que com menor intensidade.

Não obstante os desafios do aumento da eficiência, a geração e aproveitamento do biogás representam uma tecnologia amadurecida e apta para ser utilizada em escala comercial. Opção promissora de utilização de fontes renováveis de energia, nos próximos anos o biogás contribuirá ainda mais para a produção sustentável de energia e para a redução de emissões de gases do efeito estufa. Este guia tem como objetivo contribuir para essa evolução.

12.6 Fontes bibliográficas

- [12-1] Vogt, R. et al.: Optimierung für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. IFEU, Heidelberg (coordenação) e IE, Leipzig, Öko-Institut, Darmstadt, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, TU Berlin, S. Klinski, Berlin, bem como Peters Umweltplanung, subcontratação, Berlin. Projeto de pesquisa do Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança de Reatores Nucleares). Relatório final com volumes de materiais (vol. A – Q), Heidelberg 2008. www.ifeu.de; www.erneuerbare-energien.de
- [12-2] AGEB – Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2008, Berlin, 01/2009
<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118> (data: 04.08.2009)
- [12-3] Thrän, D. et al.: Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Relatório parcial "Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse 2008", março de 2009; Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, em cooperação com o Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; FKZ: 03MAP138; <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/36204/4593/> (data: 4.8.2009)
- [12-4] BIOGAS BAROMETER – julho de 2008; <http://www.eurobserv-er.org/downloads.asp> (data: 20.08.2009)
- [12-5] Majer, S., Daniel, J.: Einfluss des Gülleanteils, der Wärmeauskopplung und der Gärrestlagerabdeckung auf die Treibhausgasbilanz von Biogasanlagen. Conferência da KTBL "Ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger", 8 e 9 de setembro de 2008, Aschaffenburg
- [12-6] Statistisches Bundesamt: Bodenfläche (tatsächliche Nutzung). Deutschland und Bundesländer. GENESIS-ONLINE Datenbank. www.genesis.destatis.de/genesis/online



Glossário

Amônia (NH₃)	Gás contendo nitrogênio originado da degradação de compostos nitrogenados, tais como proteínas, ureia e ácido úrico.
Áreas sujeitas a explosões ^[4]	Áreas em que pode ocorrer atmosfera explosiva em função da sua localização ou condições operacionais.
Armazém de gás ^[4]	Área em que o gás é estocado em gasômetros.
Biodigestor (biorreator, digestor, reator) ^[4]	Tanque em que ocorre a degradação microbiana do substrato e a formação do biogás.
Biofertilizante	Sobra de biomassa líquida ou sólida resultante do processo de geração de biogás contendo frações de matéria anorgânica.
Biogás ^[1]	Gás originado no processo de fermentação e composto principalmente de metano e dióxido de carbono, podendo conter também, conforme o substrato, amônia, sulfeto de hidrogênio, vapor d'água e outros componentes gasosos ou vaporizáveis.
Carga orgânica volumétrica ^[1]	Relação entre a quantidade de substrato carregada diariamente no biodigestor e o volume do biodigestor (unidade: kg MOS/(m ³ · d))
Carregamento do material sólido	Processo para alimentar o biodigestor com substratos não bombeáveis ou misturas de substratos.
Colocação no mercado	Abrange o oferecimento, estocagem para distribuição, colocação à venda e todo tipo de distribuição de produtos; conceito do Regulamento Alemão de Adubos (DüMV).
Condensado	O biogás produzido no biodigestor é saturado de água e deve ser desumidificado antes do uso em usinas de cogeração. A condensação controlada ocorre por uma tubulação assentada no solo e a água é coletada em um purgador de vapor por meio da secagem do biogás.
Conteúdo de matéria seca (MS)	Porção de uma mistura de substâncias livre de água, após secagem a 105 °C.
Cossustrato ^[1]	Matéria-prima para a digestão, que, no entanto, não representa a maior parte da matéria-prima utilizada no processo de digestão completo.
Cultura energética (alemão: NawaRo) ^[5]	Conceito coletivo que denomina biomassas utilizadas para fins energéticos (excluídos os alimentos e rações). Refere-se normalmente às matérias-primas agrícolas como o milho, beterraba, forragem, sorgo e centeio verde, que, após a ensilagem, são destinadas a aplicações energéticas.
Cúpula do gasômetro ^[4]	Componente que se encaixa sobre o biodigestor, onde ocorre o acúmulo do biogás e de onde ele é retirado.
Degradabilidade anaeróbia ^[1]	Grau de conversão microbiana de substratos e cossustratos, geralmente expresso em potencial de formação de biogás.
Degradação biológica ^[5]	Decomposição de resíduos vegetais, animais e demais matérias orgânicas por microrganismos em compostos mais simples.
Depósito de biofertilizantes (tanque de esterco) ^[4]	Reservatório ou lagoa para o armazenamento de esterco, adubos líquidos e biomassa fermentada antes do seu aproveitamento.
Dessulfurização	Processo físico, biológico ou combinado para reduzir o teor de sulfeto de hidrogênio no biogás.
Dióxido de carbono (CO₂) ^[5]	Gás incolor, não inflamável, de odor levemente ácido, não tóxico, originado como produto final na combustão juntamente com a água, 4% – 5% no ar com efeito anestésico; a partir de 8%, pode provocar a morte por asfixia.

Dióxido de enxofre (SO₂) ^[5]	Gás incolor com odor ardente. O dióxido de enxofre livre na atmosfera está sujeito a uma série de processos de conversão que originam ácidos sulfurosos, ácido sulfúrico, sulfitos e sulfatos de enxofre, entre outras substâncias.
Disposição de resíduos ^[2]	A Lei Alemã de Reciclagem e Resíduos (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) define a disposição de resíduos como a eliminação de lixo, resíduos e demais restos gerados.
Emissões	Substâncias (gasosas, líquidas ou sólidas), ruídos, vibrações, radiação luminosa, térmica e outras radiações gerados por uma usina ou processo e liberados no ambiente.
Fluxo	Conforme a definição, trata-se do fluxo em volume ou em massa.
Gasômetro ^[4]	Recipiente ou bolsa plástica em que se dá o armazenamento intermediário do biogás.
Geração combinada de eletricidade e calor	Conversão simultânea de energia em energia elétrica (ou mecânica) e calor, o qual é destinado ao aproveitamento energético (calor útil).
Higienização	Etapas de processo para reduzir/eliminar agentes infecciosos e/ou fitopatogênicos (desinfecção) (ver também Regulamento Alemão de Resíduos Orgânicos e Regulamento [CE] 1774/2002).
Horas de operação a carga plena	Tempo de operação da usina a carga plena; o valor é calculado com base no número de horas de utilização total e da eficiência média ao longo de um ano, transformado para uma eficiência teórica de 100%.
Matéria orgânica seca (MOS)	A MOS é obtida pelo peso total da matéria subtraído do conteúdo de água e da matéria inorgânica. Geralmente, o seu cálculo é efetuado pela secagem a 105 °C seguida da calcinação a 550 °C.
Metano (CH₄) ^[8]	Gás incolor, inodoro e não tóxico; origina dióxido de carbono e água na combustão; o metano é um dos mais importantes gases do efeito estufa e um componente importante do biogás, gás natural, gases de aterros e de estações de tratamento. Em concentrações superiores a 4,4% em volume no ar, forma uma mistura explosiva de gases.
Microrganismos anaeróbios ^[3]	Microrganismos que vivem em ambiente livre de oxigênio; para algumas espécies, a presença do oxigênio pode ser fatal.
Óxido de nitrogênio ^[8]	Os gases óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO ₂) são agrupados sob o termo NO _x (óxidos de nitrogênio). Eles são formados em todos os processos de combustão como compostos entre o nitrogênio do ar e o oxigênio, mas também pela oxidação de compostos nitrogenados contidos no combustível.
Preparação	Etapas que consistem em preparar os substratos ou biofertilizantes por meio de diferentes intervenções, tais como fragmentação, separação de materiais estranhos, homogeneização, separação da fase líquida da sólida.
Raspador de gordura	Equipamento para a separação física de gorduras e óleos orgânicos não emulsificados que ocorrem, por exemplo, nos efluentes de restaurantes, cozinhas de grande porte, empresas de abate e processamento de carne, indústrias de peixe, fábricas de margarina e fábricas de óleos (cf. DIN 4040).
Relação C/N ^[6]	Relação entre a massa total de carbono e a massa total de nitrogênio na matéria orgânica, determinante no processo de degradação biológica.
Resíduo, geral	Resíduos da produção e consumo que quem produz descartou, deseja ou deve descartar.
Silagem	Material vegetal conservado pela fermentação láctica.
Síloxano ^[9]	Compostos orgânicos de silício (combinações entre o silício (Si), oxigênio (O), carbono (C) e hidrogênio (H)).
Substrato ^[1]	Matéria-prima a fermentação (digestão).
Sulfeto de hidrogênio (H₂S) ^[4]	Gás muito tóxico, incolor, com cheiro de ovo podre. Mesmo em pequenas concentrações pode ser fatal. A partir de uma determinada concentração, paralisa o olfato e o gás não pode mais ser sentido.
Taxa de degradação ^[1]	Redução da concentração de matéria orgânica ocasionada pela digestão anaeróbia, com base na quantidade inicial do substrato.
Tempo de retenção ^[1]	Tempo médio de permanência do substrato no biodigestor.
Tratamento anaeróbio ^[1]	Processo biotecnológico em ambiente sem oxigênio que visa a decomposição de matéria orgânica para gerar biogás.
Usina de biogás ^[4]	Usina para a geração, armazenamento e utilização de biogás, incluindo elementos e equipamentos necessários para a sua operação; a geração de gás ocorre pela fermentação de substâncias orgânicas.
Usina de cogeração de energia	Sistema destinado a converter a energia química em energia elétrica e térmica por meio de um motor e um gerador a ele acoplado.

Valor U ^[8]	Transmitância térmica, que mede o fluxo de calor em um metro quadrado de um componente, a uma diferença de temperatura de 1 grau Kelvin. Quanto menor o valor U, menores são as perdas de calor.
Vetor energético final ^[7]	Forma de energia utilizada pelo consumidor final (p. ex. óleo de aquecimento no tanque do consumidor, cavacos para o uso em caldeiras, energia elétrica doméstica, aquecimento distrital no ponto de transferência residencial). Eles resultam de vetores energéticos secundário e primário, dos quais são subtraídas as perdas de conversão e distribuição, o consumo de energia das conversões até a energia final, bem como o consumo não energético. A sua conversão resulta na energia útil.
Vetor energético primário ^[7]	Substâncias ou campos energéticos não submetidos à conversão por meios técnicos e dos quais se pode obter diretamente energia ou vetores energéticos secundários, por meio de uma ou várias conversões (p. ex. carvão betuminoso, lignito, petróleo, biomassa, energia eólica, energia solar, energia geotérmica).
Vetor energético secundário ^[7]	Vetor energético originado de um vetor primário ou de outro vetor secundário por meio de conversão em equipamentos, p. ex. gasolina, óleo de aquecimento, energia elétrica. Ao ser convertida a energia, ocorrem perdas de conversão e distribuição.

Fontes bibliográficas:

- [1] Diretriz VDI (2006): Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. VDI 4630, abril de 2006, Beuth Verlag GmbH
- [2] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG), 1994/2009, §3 Begriffsbestimmung http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/krw-_abfg/gesamt.pdf, último acesso: 09.08.2010
- [3] Madigan, Michael T.; Martinko, John M. ; Parker, Jack: Biology of microorganisms. Edição: 9ª. Publicação: Upper Saddle River, N.J. [etc.], Prentice-Hall, 2000, ISBN 0-13-085264-3
- [4] Bundesverband der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften (Hrsg.): Technische Information 4 - Sicherheitsregeln für Biogasanlagen, <http://www.lsv.de/fob/66dokumente/info0095.pdf>; outubro de 2008
- [5] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (Hrsg.): Umweltlexikon. http://www.stmug.bayern.de/service/lexikon/index_n.htm, último acesso: 09.08.2010
- [6] Schulz, H. e Eder, B. (2006): Biogas - Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3. Edição completamente revista e ampliada, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, ISBN 978-3-936896-13-8
- [7] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.): Basiswissen Bioenergie - Definitionen der Energiebegriffe. In: Leitfaden Bioenergie, Herausgeber FNR, Gülzow 2000, <http://www.bio-energie.de/allgemeines/basiswissen/definitionen-der-energiebegriffe/> Último acesso: 09.08.2010
- [8] KATALYSE Institut für angewandte Umweltforschung e. V. (Hrsg.): Umweltlexikon-Online. <http://www.umweltlexikon-online.de/RUBhome/index.php> , último acesso: 09.08.2010
- [9] Umweltbundesamt GmbH (N.E.: Áustria)(Hrsg.): Siloxanos <http://www.umweltbundesamt.at/umweltinformation/schadstoff/silox/?&tempL=>, Último acesso: 09.08.2010

Índice de abreviaturas



ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (Grupo de Trabalho para o Consumo Econômico e Ecológico de Energia)	EAM	equivalente de adubação mineral
		EE	extrato etéreo
		EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz (Lei Alemã de Energias Renováveis)
ATB	Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (Instituto de Tecnologia Agrária Bornim)	EFE	empresa de fornecimento de energia elétrica
		el ou elétr.	
		ENN	extrativo não nitrogenado
ATP	adenosina trifosfato	FB	fibra bruta
		Fe	ferro
Bauleistungen	(Norma Alemã de Contratação de Serviços de Construção)	FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Agência Técnica de Biomassas Dedicadas)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutz-Gesetz (Lei Alemã de Proteção contra Emissões)	FP	fornecedor principal
		FS	fermentação a seco
BioAbfV	Bioabfallverordnung (Regulamento Alemão de Resíduos Orgânicos)	g	grama
		GEE	gás do efeito estufa
C	carbono	H ₂ S	sulfeto de hidrogênio
C/N	relação carbono/nitrogênio	ha	hectare
CCM	mix de milho e espiga (corn cob mix)		
CH ₄	metano	K	Kelvin
CHP	calor e energia combinados (do inglês: combined heat and power)	KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Curadoria Alemã para a Tecnologia e Construção na Agricultura)
Co	cobalto		
CO ₂	dióxido de carbono		
COV	carga orgânica volumétrica		
d	dia	l	litro
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (Centro Alemão de Pesquisa de Biomassa)	LEO	limite de exposição ocupacional (substitui o MAK, antigamente utilizado na Alemanha)
DG	digestibilidade	MDPS	milho desintegrado com palha e sabugo
DQO	demanda química de oxigênio	MF	matéria fresca
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. (Associação Técnico-Científica Alemã para Gás e Água)	Mg	magnésio
		MM	matéria mineral
		Mn	manganês

Mo	molibdênio	RPM	rotações por minuto
MOS	matéria orgânica seca		
MS	matéria seca	S	enxofre
		Se	selênio
N	nitrogênio	SPI	silagem de planta inteira
N.E.	não especificado		
NADP	nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato	TA	diretriz técnica alemã (do alemão: Technische Anleitung)
NawaRo	cultura energética/biomassa dedicada (abreviatura alemã de nachwachsender Rohstoff, cuja tradução literal é matéria-prima renovável)	th	térmico
		TRH	tempo de retenção hidráulica
		UBG	usina de biogás
		UE	União Europeia
		UGM	unidade de gado maior
NH ₃	amônia	VL	vacas leiteiras
NH ₄	amônio	VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (Norma Alemã de Contratação de Serviços de Construção)
Ni	níquel		
O	oxigênio		
P	fósforo	vol.	volume
PB	proteína bruta	vTI	Johann Heinrich von Thünen-Institut
ppm	partes por milhão		
PV	produção de vegetais	W	tungstênio

Endereços das instituições



Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)
Department für Nachhaltige Agrarsysteme
Peter-Jordan-Str. 82
1190 Viena
Áustria
Internet: www.boku.ac.at

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
(DBFZ)
Bereich Biochemische Konversion (BK)
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Alemanha
Internet: www.dbfz.de

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der
Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49
64289 Darmstadt
Alemanha
Internet: www.ktbl.de

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)
Naumburger Str. 98
07743 Jena
Alemanha
Internet: www.thueringen.de/de/tll

Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Alemanha
Internet: www.vti.bund.de

Bayrische Landesanstalt für Landtechnik (LfL)
Institut für Ländliche Strukturentwicklung,
Betriebswirtschaft und Agrarinformatik
Menzingerstraße 54
80638 Munique
Alemanha
Internet: www.lfl.bayern.de

PARTA Buchstelle für Landwirtschaft und Gartenbau
GmbH
Rochusstraße 18
53123 Bonn
Alemanha
Internet: www.parta.de

Rechtsanwaltskanzlei Schnutenhaus & Kollegen
Reinhardtstr. 29 B
10117 Berlin
Alemanha
Internet: www.schnutenhaus-kollegen.de



Editor

Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e.V. (FNR)
OT Gülzow • Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Alemanha
Tel.: +49 38 43 / 69 30 - 0
Fax: +49 38 43 / 69 30 - 102
info@fnr.de • www.fnr.de

Publicado pela Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e. V. (FNR),
com o apoio do Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do
Consumidor da Alemanha, em virtude de uma decisão do Parlamento
Federal Alemão.

FNR 2013