

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,

MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM DUPLO
ESTÁGIO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
PARA OBTENÇÃO DE BIOGÁS**

Fernanda Luísa Sampaio de Brito

Belo Horizonte

2011

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM DUPLO
ESTÁGIO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
PARA OBTENÇÃO DE BIOGÁS**

Fernanda Luísa Sampaio de Brito

Fernanda Luísa Sampaio de Brito

**BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM DUPLO
ESTÁGIO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
PARA OBTENÇÃO DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientador: Gilberto Caldeira Bandeira de Melo

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho, agradeço ao Professor Gilberto Caldeira, pela oportunidade de participar desta pesquisa e orientação técnica nos estudos.

À empresa Éluo Soluções Ambientais Ltda., também pela oportunidade de participação na pesquisa e contatos no setor Sucroalcooleiro. Ao César Silveira, pelo grande auxílio e apoio operacional no funcionamento da planta piloto, objeto de estudo da presente pesquisa.

Aos profissionais da BTU - Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Professor Günter Busch e Marko Burkhardt, também pelo grande auxílio técnico e operacional da planta piloto estudada.

À Alpha Destilaria, em especial aos Senhores Eduardo e Edmilson, pelo fornecimento de substrato bagaço de cana para a pesquisa, auxílio em análises laboratoriais e informações fornecidas sobre o processo produtivo das usinas de produção de álcool.

A todos os professores do DESA, pelo grande aprendizado neste período.

Às funcionárias Norma, Olívia, Lucilaine, Camila, Danuza, Dona Chica, Cristiane e Iara, por todo o acompanhamento do meu trabalho e seu profissionalismo.

À colega de mestrado Edna Perrone, pelo companheirismo durante todo este período. À doutoranda Eliane Santos e ao Glayson Reder, pelo companheirismo e ajuda prestada.

À toda minha família, em especial meus pais, Fernando e Margareth, e irmãs, Daniela e Renata, pelo apoio e carinho de sempre. Em especial ao meu pai, pelo grande auxílio nas coletas de bagaço de cana. Ao Re, também por todo apoio, companheirismo e carinho neste momento.

À Brandt Meio Ambiente, por me permitir a realização desta pesquisa, em paralelo às minhas atividades profissionais. Aos meus colegas de trabalho, por todos os auxílios prestados.

A todos os meus amigos e amigas, que tanto torceram por mim durante este período.

E a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Atualmente o Brasil é considerado um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, colocando-o na liderança mundial em tecnologia de produção de etanol. Juntamente com o aumento sucessivo das safras, aumenta-se a geração de bagaço de cana-de-açúcar, que possui grande potencial energético e é considerado o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no país. Grande parte das usinas sucroalcooleiras brasileiras tem feito o aproveitamento energético do bagaço através da co-geração, que consiste na queima do bagaço para geração de energia elétrica. Visando à obtenção de um melhor aproveitamento energético do bagaço de cana, a presente pesquisa propõe a aplicação de um método alternativo de geração de energia a partir deste substrato, o qual se constitui na geração de biogás através do processo de biodigestão anaeróbia, em complementação à co-geração atualmente praticada. O processo de biodigestão anaeróbia foi realizado em planta piloto específica para digestão de material sólido, conforme Patente de Busch & Sieber (2006). Foi feita a comparação da rota tradicional de geração de energia (co-geração) e da rota alternativa (produção de biogás em planta piloto e posterior co-geração do bagaço processado na planta). A comparação entre as rotas se deu pelo somatório do potencial energético de cada uma, em termos do Poder Calorífico Inferior – PCI do bagaço e biogás gerados, por unidade de massa de bagaço de cana. De acordo com os resultados obtidos, em termos quantitativos, o potencial de geração de energia se mostrou semelhante nas 2 rotas estudadas. Considerando-se o bagaço em base seca, ocorreu um aumento do PCI geral total final, de cerca de 3,5%, enquanto para o bagaço em base úmida, foi identificado um decréscimo de cerca de 22,5% do PCI total final. Em termos qualitativos, a produção de biogás por quilograma de bagaço processado não se mostrou significativa, sendo seu potencial energético bastante inferior ao potencial do bagaço final, após processamento na planta piloto (percentual máximo de 1,47% em relação ao potencial total). A reduzida produção de biogás foi atribuída à baixa biodegradabilidade das fibras presentes no bagaço, sendo que o combustível produzido foi resultado, principalmente, da digestão do açúcar remanescente no substrato. Os ciclos de processo contendo resultados mais positivos estão vinculados às amostras com maior percentual de sólidos solúveis e açúcar redutor total, competindo desta forma com a própria eficiência do processo de extração de etanol.

ABSTRACT

Brazil has become one of the largest sugarcane producers, being one of the world's leaders in ethanol production technology. As ethanol production increases, the total amount of sugarcane bagasse is also increased. Sugarcane bagasse has a great energy potential and is currently considered the Brazilian largest agro-industrial residue. Most of Brazilian sugarcane plants have made the exploitation of bagasse energy through co-generation, which is the burning of bagasse for power generation. In order to obtain a better energy yield from sugarcane bagasse, this research proposes the application of an alternative method of generating energy from this substrate, which constitutes the generation of biogas through anaerobic digestion process, complementing cogeneration currently practiced. The process of anaerobic digestion was carried out in specific pilot plant for digestion of solid material, as Busch & Sieber Patent (2006). We compared the traditional route of power generation (co-generation) and the alternative route (biogas production in pilot plant and later co-generation of processed bagasse in the pilot plant). The comparison between the routes was given by the sum of the energy potential of each one in terms of Net Calorific Value - PCI bagasse and biogas generated per unit mass of sugarcane bagasse. According to the results obtained, in quantitative terms, the potential for power generation (in terms of PCI) was similar in the two routes studied. Considering the substrate on dry basis, an increase of the overall PCI was around 3.5%, while for wet substrate, it was identified a decrease of approximately 22.5% of total PCI. In qualitative terms, the production of biogas per kg of bagasse processed was not significant in comparison with the energy potential of the bagasse processed at the pilot plant (maximum of 1,47% compared to the total potential). Small production of biogas was attributed to the low biodegradability of the bagasse fibers, while the fuel produced was primarily a result of digestion of sugar remaining in the substrate. The substrate samples containing more positive results are those with higher percentage of initial soluble solids, and total reducing sugar, thus competing with the very efficiency of extraction of ethanol.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. Cultura da Cana-de-açúcar: aspectos gerais	4
3.1.1. A cana-de-açúcar – variedades e composição química.....	4
3.2 – As Usinas Sucroalcooleiras e a Geração de Energia	8
3.2.1 – Processo de produção de álcool e geração de bagaço de cana-de-açúcar.....	9
3.2.2 – Bagaço de cana-de-açúcar como potencial gerador de energia.....	13
3.2.2.1 – Bagaço de cana-de-açúcar e a co-geração de energia elétrica	15
3.3 – Alternativas para geração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar e seu melhor aproveitamento	17
3.4 - Biodigestão Anaeróbia de Materiais Orgânicos aplicada à Geração de Energia	18
3.4.1 – Conceitos gerais e fundamentos da biodigestão anaeróbia.....	18
3.4.2 - Características e tipos de processos controlados de biodigestão anaeróbia.....	27
3.4.3 – Processos anaeróbios utilizados para o processamento de biomassa e geração de energia.....	31
3.4.3.1 – Pré-tratamento de biomassa visando melhorias no processo de digestão	33
3.4.4 – O biogás.....	35
3.5. Biodigestão de Materiais Biogênicos em Duplo estágio – Tecnologia para otimização da biodigestão aplicada à produção de biogás – Processo Busch & Sieber	38
3.5.1 – Histórico dos processos a seco e a úmido, em duplo estágio.....	38
3.5.2 – Descrição geral do processo Busch & Sieber	38
3.5.2.1 - Condições operacionais.....	43
3.5.3 – Biodegradabilidade durante a operação do processo Busch & Sieber (2006)	46
3.5.4 – Controle da produção de biogás pelo processo Busch & Sieber (2006)	47
3.5.5 – Particularidades e limitações do processo Busch & Sieber (2006)	48
4. MATERIAL E MÉTODOS	50
4.1 – Visita inicial de reconhecimento em Usina de produção de álcool	51
4.2 – Origem e coleta do bagaço de cana-de-açúcar processado na Planta Piloto	51
4.3 – Caracterização físico-química do bagaço de cana-de-açúcar	54
4.3.1 – Composição imediata	55
4.3.1.1 – Determinação da umidade	56
4.3.1.2 – Determinação dos materiais voláteis.....	57
4.3.1.3 – Determinação das cinzas.....	57
4.3.1.4 – Determinação do carbono fixo	58
4.3.2 – Determinação da Matéria Orgânica Seca	58
4.3.3 – Composição básica	59
4.3.3.1 – Teores de Umidade, Fibras, Sólidos Solúveis (brix) e Açúcares Redutores Totais (ART).....	59
4.3.3.2 - Composição das fibras na cana.....	61
4.4 – Construção e Montagem da Planta Piloto	61
4.4.1 – Módulos individuais principais da planta piloto	64
4.4.1.1 - Tanques de hidrólise.....	64
4.4.1.2 - Reator anaeróbio	65
4.4.1.3 - Sistema de aquecimento e controle da água circulada nas serpentinas do reator anaeróbio ..	67
4.4.1.4 – Tanque pulmão e tanque de estocagem	67
4.4.1.5 – Sistema de bombeamento de circulação de soluções.....	68
4.4.1.6 – Plataforma de base	68
4.4.2 – Inoculação do reator anaeróbio	69
4.4.3 – Montagem final da planta piloto – montagem dos módulos individuais.....	70
4.5. Operação da Planta Piloto para o processamento de bagaço de cana-de-açúcar – aspectos operacionais e análises laboratoriais de rotina	74
4.5.1 - Partida inicial da planta piloto	74
4.5.2 - Testes de comissionamento da planta piloto	78

4.5.3 – Operação de rotina da planta piloto: processamento do bagaço de cana-de-açúcar.....	79
4.5.3.1 – Atividades de rotina e controle operacional.....	81
4.5.3.2 – Determinação da duração dos ciclos de processo	86
4.5.3.3 – Controle da produção de biogás	87
4.6. Obtenção de correlações típicas de parâmetros físico-químicos para o processamento do bagaço de cana-de-açúcar	87
4.7. Cálculo dos potenciais de geração de energia das 02 (duas) rotas de processo consideradas	89
4.7.1 – Bagaço de cana-de-açúcar: determinação da energia bruta e poder calorífico inferior – PCI	89
4.7.1.1 – Determinação do PCI – base seca.....	90
4.7.1.2 – Determinação do PCI – base úmida.....	91
4.7.2 – Biogás produzido na planta piloto: estimativa do poder calorífico inferior – PCI.....	92
4.7.3 – Balanço energético final	92
4.8. Tabela síntese das atividades operacionais relacionadas à planta piloto	94
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
5.1 - Resultados operacionais da planta piloto - protocolos de funcionamento, rendimento e produção de biogás	96
5.1.1 - Ciclo de Transição.....	97
5.1.2 - Ciclos Válidos – avaliação individual dos ciclos	101
5.1.3 - Ciclos Válidos – avaliação conjunta dos ciclos operacionais	131
5.1.3.1 – Produção de metano e biogás	131
5.1.3.2 – Parâmetros de controle operacional.....	138
5.1.4 – Ciclos válidos - Balanço de massa para o bagaço de cana-de-açúcar	140
5.2 - Balanço energético das rotas 1 e 2 – rotas tradicional e alternativa para produção de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar	149
5.2.1 – Poder calorífico inferior – PCI do bagaço de cana-de-açúcar.....	150
5.2.1.1 – Poder calorífico inferior – PCI na base seca	150
5.2.1.2 – Poder calorífico inferior – PCI na base úmida	152
5.2.2 – Poder calorífico inferior – PCI do biogás produzido	153
5.2.3 – Balanço energético final	155
5.2.3.1 – Balanço energético na Condição 1: bagaço de cana em base seca	155
5.2.3.2 – Balanço energético na Condição 2: bagaço de cana em base úmida	157
5.3 – Discussão final	160
6. CONCLUSÕES	162
7. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES.....	164
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Fluxograma ilustrativo das etapas do processo de fabricação de álcool – destaque para a etapa geradora de bagaço de cana	11
Figura 3.2: Desenho esquemático do processo de co-geração simples	16
Figura 3.3: Desenho esquemático das rotas metabólicas envolvidas no processo de digestão anaeróbia	22
Figura 3.4: Taxas relativas de crescimento das arqueas metanogênicas em função da temperatura	23
Figura 3.5: Desenho esquemático do aparato de biodigestão de Busch & Sieber (2006)	40
Figura 3.6: Biodegradabilidade de alguns substratos orgânicos	47
Figura 4.1: Geração de bagaço de cana-de-açúcar na Usina – pilha de bagaço recém gerado (ao fundo, disposição de bagaço “antigo”)	53
Figura 4.2: Geração de bagaço de cana-de-açúcar na Usina – pilha de bagaço recém gerado – foto 2	53
Figura 4.3: Geração de bagaço de cana-de-açúcar na Usina – pilha de bagaço recém gerado – foto 3	53
Figura 4.4: Geração de bagaço de cana-de-açúcar na Usina – pilha de bagaço recém gerado – foto 4 – detalhe	53
Figura 4.5: Coleta de bagaço de cana-de-açúcar – 11/08/2009 – foto 1	53
Figura 4.6: Coleta de bagaço de cana-de-açúcar – 11/08/2009 – foto 2	53
Figura 4.7: Desenho esquemático da planta piloto de geração de biogás através do processo de duplo estágio – processo em batelada	63
Figura 4.8: Planta piloto montada e em estágio inicial de operação	64
Figura 4.9: Colocação de tela na base dos tanques – foto 1	65
Figura 4.10: Colocação de tela na base dos tanques – foto 2	65
Figura 4.11: Reator anaeróbio sendo revestido com serpentina de cobre, por sua vez coberta com fita adesiva específica	66
Figura 4.12: Detalhe do sistema de aquecimento da água de aquecimento do reator anaeróbio	67
Figura 4.13: Tanques de hidrólise – detalhe	71
Figura 4.14: Tanque pulmão – detalhe	72
Figura 4.15: Reator anaeróbio – detalhe	72
Figura 4.16: Tanque de estocagem – detalhe	73
Figura 4.17: Sistema de aquecimento de água para o reator anaeróbio	73
Figura 4.18: Painel central de controle – detalhe	74
Figura 5.1: Volume de biogás acumulado por quilograma de matéria orgânica seca	99
Figura 5.2: Percentual de metano diário em função do volume de biogás acumulado	100
Figura 5.3: Volume de metano acumulado por quilograma de matéria orgânica seca	100
Figura 5.4: Bagaço inicial e final	101
Figura 5.5: Bagaço de cana após a biodigestão	102
Figura 5.6: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 01	103
Figura 5.7: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 02	103
Figura 5.8: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 03	103
Figura 5.9: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 04	103
Figura 5.10: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 05	103
Figura 5.11: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 06	103
Figura 5.12: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 07	103
Figura 5.13: Biogás acumulado por kg MOS - ciclo válido 08	103
Figura 5.14: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 01	104
Figura 5.15: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 02	104
Figura 5.16: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 03	104
Figura 5.17: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 04	104
Figura 5.18: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 05	104
Figura 5.19: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 06	104
Figura 5.20: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 07	104
Figura 5.21: Metano diário (%) X volume acumulado de biogás – ciclo válido 08	104
Figura 5.22: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 01	105
Figura 5.23: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 02	105
Figura 5.24: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 03	105
Figura 5.25: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 04	105
Figura 5.26: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 05	105
Figura 5.27: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 06	105
Figura 5.28: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 07	105
Figura 5.29: Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 08	105
Figura 5.30: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 01	106
Figura 5.31: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 02	106
Figura 5.32: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 03	106
Figura 5.33: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 04	106

Figura 5.34: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 05	106
Figura 5.35: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 06	106
Figura 5.36: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 07	106
Figura 5.37: Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 08	106
Figura 5.38: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 01	107
Figura 5.39: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 02	107
Figura 5.40: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 03	107
Figura 5.41: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 04	107
Figura 5.42: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 05	107
Figura 5.43: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 06	107
Figura 5.44: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 07	107
Figura 5.45: Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 08	107
Figura 5.46: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 01	108
Figura 5.47: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 02	108
Figura 5.48: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 03	108
Figura 5.49: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 04	108
Figura 5.50: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 05	108
Figura 5.51: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 06	108
Figura 5.52: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 07	108
Figura 5.53: Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 08	108
Figura 5.54: Evolução do pH – ciclo válido 01	109
Figura 5.55: Evolução do pH – ciclo válido 02	109
Figura 5.56: Evolução do pH – ciclo válido 03	109
Figura 5.57: Evolução do pH – ciclo válido 04	109
Figura 5.58: Evolução do pH – ciclo válido 05	109
Figura 5.59: Evolução do pH – ciclo válido 06	109
Figura 5.60: Evolução do pH – ciclo válido 07	109
Figura 5.61: Evolução do pH – ciclo válido 08	109
Figura 5.62: Evolução da DQO – ciclo válido 01	110
Figura 5.63: Evolução da DQO – ciclo válido 02	110
Figura 5.64: Evolução da DQO – ciclo válido 03	110
Figura 5.65: Evolução da DQO – ciclo válido 04	110
Figura 5.66: Evolução da DQO – ciclo válido 05	110
Figura 5.67: Evolução da DQO – ciclo válido 06	110
Figura 5.68: Evolução da DQO – ciclo válido 07	110
Figura 5.69: Evolução da DQO – ciclo válido 08	110
Figura 5.70: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 01	111
Figura 5.71: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 02	111
Figura 5.72: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 03	111
Figura 5.73: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 04	111
Figura 5.74: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 05	111
Figura 5.75: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 06	111
Figura 5.76: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 07	111
Figura 5.77: Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 08	111
Figura 5.78: Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 01	112
Figura 5.79: Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 02	112
Figura 5.80: Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 04	112
Figura 5.81: Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 05	112
Figura 5.82: Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 06	112
Figura 5.83: Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 07	112
Figura 5.84: Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 08	112
Figura 5.85: DQO X metano acumulado – ciclo válido 01	113
Figura 5.86: DQO X metano acumulado – ciclo válido 02	113
Figura 5.87: DQO X metano acumulado – ciclo válido 03	113
Figura 5.88: DQO X metano acumulado – ciclo válido 04	113
Figura 5.89: DQO X metano acumulado – ciclo válido 05	113
Figura 5.90: DQO X metano acumulado – ciclo válido 06	113
Figura 5.91: DQO X metano acumulado – ciclo válido 07	113
Figura 5.92: DQO X metano acumulado – ciclo válido 08	113
Figura 5.93: Produção acumulada de biogás – ciclos válidos	133
Figura 5.94: Produção acumulada de metano – ciclos válidos	133
Figura 5.95: Percentual de metano no biogás – ciclos válidos	134
Figura 5.96: Produção acumulada de metano por dia – Box plot	134
Figura 5.97: Percentual de metano no biogás por dia – Box plot	135
Figura 5.98: Redução de massa seca, materiais voláteis, ART, brix e fibras por variedade de bagaço	147
Figura 5.99: Desenho esquemático da Rota 1 – tradicional	150
Figura 5.100: Desenho esquemático da Rota 2 – alternativa	150

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Características das variedades de cana-de-açúcar mais plantadas na Região 6	6
Centro-Sul do Brasil – Destaque para as variedades mais recomendadas para plantio em Minas Gerais	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição média da cana-de-açúcar	7
Tabela 3.2: Principais constituintes da cana-de-açúcar em termos de sólidos solúveis	8
Tabela 3.3: Produção brasileira de álcool (em metros cúbicos) nas safras 2001/2002 a 2006/2007	8
Tabela 3.4: Composição química média do bagaço de cana-de-açúcar (em massa)	14
Tabela 3.5: Faixas ótimas de pH para as diferentes etapas da biodigestão anaeróbia	24
Tabela 3.6: Composição química das arqueas metanogênicas	25
Tabela 3.7: Concentrações estimuladoras e inibidoras de alguns cátions	26
Tabela 3.8: Efeitos da amônia livre sobre os processos anaeróbios	26
Tabela 3.9: Percentual de gases no biogás em função do substrato orgânico de origem	36
Tabela 3.10: Poder calorífico inferior de diferentes combustíveis	37
Tabela 4.1: Relação entre os parâmetros da composição imediata e a matéria orgânica seca	55
Tabela 4.2: Exatidão das leituras do analisador de gases digital	84
Tabela 4.3: Síntese das atividades operacionais por fase de operação da planta piloto	95
Tabela 5.1: Relação de variedades da cana-de-açúcar, amostras de bagaço coletadas para processamento na planta piloto e ciclos de processo	97
Tabela 5.2: Dados iniciais do bagaço de cana para determinação das taxas de circulação de solução	98
na planta piloto – ciclo de transição	
Tabela 5.3: Características da solução nova adicionada na planta piloto (água nova + biofertilizante)	99
Tabela 5.4: Medições diárias realizadas na planta piloto – ciclo de transição	99
Tabela 5.5: CICLO VÁLIDO 01 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	115
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.6: CICLO VÁLIDO 02 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	115
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.7: CICLO VÁLIDO 03 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	116
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.8: CICLO VÁLIDO 04 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	116
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.9: CICLO VÁLIDO 05 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	117
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.10: CICLO VÁLIDO 06 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	117
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.11: CICLO VÁLIDO 07 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	118
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.12: CICLO VÁLIDO 08 – Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução	118
na planta piloto e características da solução nova	
Tabela 5.13: CICLO VÁLIDO 01 – Medições realizadas na planta piloto	119
Tabela 5.14: CICLO VÁLIDO 02 – Medições realizadas na planta piloto	119
Tabela 5.15: CICLO VÁLIDO 03 – Medições realizadas na planta piloto	120
Tabela 5.16: CICLO VÁLIDO 04 – Medições realizadas na planta piloto	121
Tabela 5.17: CICLO VÁLIDO 05 – Medições realizadas na planta piloto	122
Tabela 5.18: CICLO VÁLIDO 06 – Medições realizadas na planta piloto	123
Tabela 5.19: CICLO VÁLIDO 07 – Medições realizadas na planta piloto	124
Tabela 5.20: CICLO VÁLIDO 08 – Medições realizadas na planta piloto	125
Tabela 5.21: Análise de cromatografia gasosa no “biogás” gerado no período final de um dos ciclos	136
de processo	
Tabela 5.22: Valores acumulados de metano produzido por quilograma de bagaço seco processado (inicial)	138
Tabela 5.23: Balanço de massa para o bagaço de cana – ciclos processados com o Bagaço Novo 1	141
Tabela 5.24: Balanço de massa para o bagaço de cana – ciclos processados com o Bagaço Novo 2	142
Tabela 5.25: Balanço de massa para o bagaço de cana – ciclos processados com o Bagaço Novo 3	143
Tabela 5.26: Composição das fibras – ciclos processados com o Bagaço Novo 1	144
Tabela 5.27: Composição das fibras – ciclos processados com o Bagaço Novo 2	144
Tabela 5.28: Composição das fibras – ciclos processados com o Bagaço Novo 3	144
Tabela 5.29: Redução de massa seca, materiais voláteis, ART, brix e fibras por variedade de bagaço	147
e ciclos em geral	
Tabela 5.30: Valores de PCI (Base Seca) do bagaço de cana-de-açúcar inicial e final	151
Tabela 5.31: Valores de PCI (Base Úmida) do bagaço de cana-de-açúcar inicial e final	152
Tabela 5.32: Valores de poder calorífico do biogás produzido (expressos por quilograma de bagaço	154
seco processado)	
Tabela 5.33: Valores de poder calorífico do biogás produzido (expressos por quilograma de bagaço	154
úmido processado)	
Tabela 5.34: Balanço energético das rotas propostas (Base Seca) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa)	156
Tabela 5.35: Percentual do poder calorífico referente ao bagaço seco (base seca) e biogás produzidos	156
na Rota 2	

Tabela 5.36: Balanço energético das rotas propostas (Base Seca) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa).....	157
- em termos de energia TOTAL disponível (kcal total)	
Tabela 5.37: Balanço energético das rotas propostas (Base Úmida) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa) ..	158
Tabela 5.38: Percentual do poder calorífico referente ao bagaço úmido e biogás produzidos (base úmida)	159
na Rota 2	
Tabela 5.39: Balanço energético das rotas propostas (Base Úmida) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa) ..	159
- em termos de energia TOTAL disponível (kcal total)	

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ART – Açúcares redutores totais
Brix – Sólidos solúveis
BTU - Brandenburgische Technische Universität Cottbus
CEASA - Centrais de Abastecimento de Minas Gerais S/A
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo / SP
CONSECANA - Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
COPERSUCAR - Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
CTC – Centro de Tecnologia Canavieira
DESA – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
DQO – Demanda química de oxigênio
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA - U.S. Environmental Protection Agency
FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GLP – Gás liquefeito de petróleo
IAC – Instituto Agrônômico de Campinas
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MOS – Matéria orgânica seca
PCI – Poder calorífico inferior
PCIt – Poder calorífico inferior, base de trabalho
PCS – Poder calorífico superior
PCSs – Poder calorífico superior, base seca
pH – Potencial hidrogeniônico
PVC – Policloreto de vinila
RETEC – Rede de Tecnologia de Minas Gerais
Rn – Requisito de nutriente
SINDASUCAR - Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool no Estado de Pernambuco
SST – Sólidos totais
SSV – Sólidos voláteis
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
ÚNICA - União da Indústria de Cana-de-açúcar
CF – Teor de carbono fixo
CZ – Teor de cinzas
MV – Teor de materiais voláteis
TU – Teor de umidade
Wt – Umidade na base de trabalho

1. INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil tem ganhado destaque nas últimas décadas. Atualmente, o país constitui-se no maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com mais de sete milhões de hectares plantados, e com uma produção de mais de 480 milhões de toneladas de cana, colocando-o na liderança mundial em tecnologia de produção de etanol (EMBRAPA, 2010). O aumento de produtividade e expansão de áreas de plantio visando à produção deste combustível representa um aumento significativo do uso de fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira.

Conforme ÚNICA e MAPA (2009), tanto o processamento da cana-de-açúcar pelas usinas brasileiras como a produção de etanol tem crescido, principalmente, na região Centro-Sul. De acordo com dados da safra 2008/2009, nesta região foram processadas 504.962.891 toneladas de cana, com uma produção de etanol de mais de 25 bilhões de litros.

A ANEEL (2010) também destaca que, dos “combustíveis” utilizados como fonte de energia no Brasil, 26,9% correspondem à biomassa (considerando-se empreendimentos já em operação), sendo que o bagaço da cana representa cerca de 78% destes investimentos.

Ainda segundo a EMBRAPA (2010), além de matéria-prima para a produção de açúcar e álcool, os subprodutos e resíduos da cana são utilizados para co-geração de energia elétrica, fabricação de ração animal e fertilizante para as lavouras.

Neste sentido, grande parte das usinas sucroalcooleiras brasileiras tem utilizado o bagaço da cana como fonte de energia elétrica a partir da co-geração, para consumo próprio e, eventualmente, para venda do excesso produzido (Paoliello, 2006). A venda do excesso produzido, no entanto, é dificultada pelos elevados custos associados à sua própria comercialização (Souza & Azevedo, 2006).

O bagaço de cana-de-açúcar constitui-se no resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil, com estimativas de até 280 kg / tonelada de cana-de-açúcar moída (Silva *et al.*, 2007). O fato de apresentar uma composição química essencialmente orgânica, aliado às significativas taxas de geração, fazem do bagaço de cana uma fonte potencial de geração de energia renovável.

Neste sentido, pesquisas recentes têm sido realizadas visando à obtenção de um melhor aproveitamento energético a partir do bagaço de cana. Neste contexto, uma possível

alternativa para a otimização do aproveitamento energético do bagaço constitui-se na geração de biogás através do processo de biodigestão anaeróbia. Este processo de geração de biogás pode se dar em complementação ao processo de co-geração, atualmente praticado.

A aplicação do método alternativo para produção de biogás a partir do bagaço de cana, anteriormente à queima do bagaço para co-geração de energia, poderá acarretar em um aumento da quantidade total de energia gerada no processo, ou ainda em uma melhoria em termos qualitativos, na medida em que será produzido um novo combustível - biogás, que possui aplicações energéticas variadas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estudo do aproveitamento energético do bagaço de cana-de-açúcar por duas rotas de processo: rota tradicional (queima do bagaço) e rota alternativa (biodigestão anaeróbia usando tecnologia de duplo estágio e posterior queima do bagaço digerido).

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho e aplicabilidade da tecnologia de Busch e Sieber para a biodigestão anaeróbia do bagaço de cana-de-açúcar e produção de biogás;
- Definir critérios e parâmetros operacionais que favoreçam uma maior produção de metano no biogás gerado;
- Determinar e comparar o potencial de geração de energia das duas rotas de processo estudadas (rota tradicional e rota alternativa), em termos quantitativos e qualitativos, em função do Poder Calorífico Inferior – PCI do bagaço de cana-de-açúcar e do biogás.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. *Cultura da Cana-de-açúcar: aspectos gerais*

Historicamente, a cana-de-açúcar constitui-se em um dos principais produtos agrícolas do Brasil, sendo cultivada desde a época da colonização.

A importância da cana pode ser atribuída à sua múltipla utilização, podendo ser empregada in natura, sob a forma de forragem, como alimentação animal, ou como matéria prima para a fabricação de rapadura, melado, aguardente, açúcar e álcool.

Segundo Cardoso (2006), a cana-de-açúcar foi introduzida no país no ano de 1532, trazida da Ilha da Madeira (Portugal) e plantada, inicialmente, na capitania de São Vicente, hoje Estado de São Paulo. A partir desta região, a cultura da cana foi levada e implementada em outras localidades brasileiras, particularmente no Nordeste e Sudeste. No século XVI, o Brasil teve no ciclo da cana-de-açúcar o segundo grande ciclo da economia do país, sucedendo o ciclo extrativista da madeira.

Conforme abordado por Paoliello (2006), a partir de meados da década de 1970, o sistema agro-industrial da cana-de-açúcar passou por transformações significativas, quando deixou de ser exclusivamente voltado para o setor de alimentos, e passou a destinar-se também ao setor energético, através do Proálcool.

Segundo a EMBRAPA (2010), o Brasil se constitui, atualmente, no maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com mais de 7 (sete) milhões de hectares plantados. O país é considerado ainda líder mundial em tecnologia de produção de etanol a partir da cana.

3.1.1. *A cana-de-açúcar – variedades e composição química*

Segundo Graner *et al.* (1973), a cana-de-açúcar é originária de Nova Guiné, na Oceania, e pertence à família Poaceae, gênero *Saccharum*.

Conforme abordado por Cardoso (2006), entre as espécies atualmente reconhecidas e catalogadas, algumas são consideradas mais conhecidas e importantes, devido à sua utilização em trabalhos de melhoramento genético. Neste contexto, podem ser mencionadas: *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L., *Saccharum sinense* Roxb, *Saccharum barberi* Jesw, e *Saccharum robustum* Jesw.

As espécies existentes possuem diferentes características quanto à sua composição, desenvolvimento, exigência de solo, dentre outros, o que confere vantagens e desvantagens particulares. A *Saccharum officinarum L.*, por exemplo, possui como vantagens principais a quantidade mais reduzida de fibras e a riqueza em açúcar. Em contrapartida, possui desvantagens como uma elevada exigência de solo e clima, e são susceptíveis a um número mais elevado de doenças (Cardoso, 2006).

Visando um aprimoramento das características mais vantajosas das espécies conhecidas, estudos envolvendo melhoramento genético resultaram no estabelecimento e desenvolvimento de inúmeras “variedades” de cana-de-açúcar, reconhecidas internacionalmente, e que se constituem na mistura genética de espécies diferentes. Atualmente, segundo Cardoso (2006), todas as variedades de cana, cultivadas em todo o mundo para fins industriais são híbridas, envolvendo duas ou mais espécies distintas. Por este motivo, nos dias atuais, o nome científico da cana é *Saccharum spp.*

Segundo a EMBRAPA (2010), para que seja garantida a rentabilidade do setor sucroalcooleiro, é fundamental a obtenção de elevada produtividade da cana. Neste sentido, o melhoramento genético surge como um dos principais fatores agrônômicos que permitem o desenvolvimento de variedades que se adaptem melhor às condições adversas de solo e clima, à incidência de pragas e doenças, e ainda ao sistema de colheita.

A disponibilidade de uma grande diversidade de variedades de cana na lavoura, por parte do produtor, se torna importante, na medida em que este fato diminui a possibilidade de que uma praga ou doença se prolifere no canavial, ocasionando grandes prejuízos. Observa-se ainda que devem ser selecionadas as variedades que melhor se adaptarem às condições locais, devendo-se prestar atenção em características como o porte da cana, maturação, volume de matéria prima, dentre outros (EMBRAPA, 2010).

Segundo a EMBRAPA (2010), as variedades de cana-de-açúcar mais utilizadas no Brasil chegam a um número superior a 100, e são distribuídas por instituições de pesquisa, como a Planalsucar – Ridesa (RB), Copersucar (SP) – CTC (CTC), e IAC (IAC).

Considerando o Estado de Minas Gerais, segundo Cardoso (2006), atualmente, as variedades que têm sido recomendadas para plantio são: RB72-454, SP79-1011, RB76-5418, SP80-1842, RB83-5054, RB83-5486, SP80-1816, RB92-8064, RB85-5536, e RB86-7515.

O quadro 3.1 apresenta as características das variedades de cana mais plantadas na Região Centro-Sul do Brasil, com destaque àquelas mais recomendadas para plantio em Minas Gerais, segundo Cardoso (2006).

Quadro 3.1 - Características das variedades de cana-de-açúcar mais plantadas na Região Centro-Sul do Brasil – Destaque para as variedades mais recomendadas para plantio em Minas Gerais

Exigência de solos
<u>Muito exigentes</u> SP77-5181, SP87-396, SP87-344, SP83-5073, RB85-5546
<u>Exigentes</u> RB85-5453, RB85-5036, SP80-1816 , SP80-1842 , SP87-365, SP80-3280, RB85-5536 , SP86-155, SP79-1011 , SP81-320, SP91-1049
<u>Pouco exigentes</u> RB85-5156, RB83-5053, RB83-5486 , RB84-5210, RB85-5113, SP86-42
<u>Não exigentes</u> RB72-454 , RB92-8064 , RB83-5059, RB86-7515 , RB86-5230, SP83-2847, RB85-5035, SP85-5077
Maturação
<u>Super precoce</u> RB85-5156, SP87-396
<u>Precoce</u> RB83-5054 , RB85-5453, SP77-5181, RB85-5035, RB83-5486 , SP83-5073, SP80-1842 , SP86-155, IAC86-2210
<u>Média</u> SP81-3250, SP80-1816 , RB84-5210, RB85-5536 , SP87-365, RB86-5230, RB85-5113, RB92-8064 , SP85-3877, SP86-42, SP83-2847
<u>Tardia</u> RB72-454 , RB83-5089, RB86-7515
Rendimento de transporte
<u>Péssimo</u> RB83-5486 , SP80-1842 , RB83-5089, RB83-5054 , RB85-5156
<u>Regular</u> RB84-5210, SP80-1816
<u>Bom</u> SP79-1011 , SP77-5181, RB72-454 , RB85-5113, RB85-5536 , RB84-5257, RB85-5453, SP79-2233, RB86-7515 , RB92-8064 , SP81-3250
Colheita mecânica
<u>Péssimo</u> RB83-5054 , RB85-5156, RB83-5089
<u>Ruim</u> RB83-5486
<u>Boa</u> SP79-1011 , RB85-5453, SP80-3280, SP80-1816 , SP81-3250, RB85-5113, RB72-454 , SP-2233, RB86-7515 , RB92-8064
Brotação de soca ⁽¹⁾
<u>Sem restrição</u> RB82-5336, RB82-5536, RB85-5156, SP79-1011 , SP79-2233, SP80-1842 , SP80-1816 , SP80-3280, SP81-3250, RB86-5230, SP86-155, SP83-2847, RB92-8064
<u>Boa</u> RB84-5210, RB85-5113, RB83-5486 , RB83-5089, RB85-5453, RB85-5546, RB86-7515 , RB85-5035, SP87-365
Fechamento de entrelinhas ⁽²⁾
<u>Bom</u> RB82-5336, RB85-5113, RB85-5536 , SP81-3250, SP80-3280, RB93-8064, RB86-5230, SP86-155, SP87-365
<u>Regular</u> RB83-5486 , RB85-5546, SP80-1816 , RB86-7515 , RB84-5210
<u>Fraco</u> RB83-5054 , SP79-1011 , SP80-1842

Cont.

Sensibilidade a herbicidas	
<u>Muito sensível</u>	
RB85-5036, RB85-5113, SP87-365, RB86-5230, SP85-3877	
<u>Sensível</u>	
RB83-5089, RB84-5210, SP80-1816, SP80-1842	
Nematóides ⁽³⁾	
<u>Susceptível</u>	
SP80-1842 , SP81-3250, RB72-454 , RB80-6043, RB85-5113, RB84-5210	
<u>Tolerante</u>	
SP86-42, SP83-2847, RB92-8064 , RB84-5197, RB85-5156	
Florescimento	
<u>Todos os anos</u>	
RB85-5035, RB85-5156, RB85-5453, RB84-5197, RB86-5230, SP83-2847	
<u>Regularmente</u>	
SP80-1842 , SP80-3280, RB83-5486 , SP81-3250, SP87-365	
<u>Raro</u>	
RB83-5089, RB80-6043, RB72-454, SP80-1816, RB86-7515 , SP85-3877	
<u>Não floresce</u>	
RB83-5054 , RB85-5113, RB85-5536 , RB84-5210, RB92-8064, SP79-1011 , SP83-5073	
Maturadores	
<u>Resposta instável</u>	
SP81-3250	
<u>Excelente resposta</u>	
RB85-5156, RB85-5453, RB85-5536, RB83-5486 , SP86-42, RB86-7515	
Tolerância a seca	
RB86-7515 , RB75-8540, SP79-1011, RB83-5054, SP80-1842 , RB85-5002, RB85-5156, SP83-5073	
Exigentes em água	
SP79-2233, RB85-5453, RB80-1816, RB85-5536 , SP87-344, SP85-3877	

Variedades em negrito: mais recomendadas para plantio em Minas Gerais, segundo Cardoso (2006).

(1) Soca de cana: a cana é chamada de cana soca a partir da sua segunda produção, após a primeira colheita (corte).

(2) Arranjo / espaçamento de plantio, que pode trazer benefícios à produtividade, melhor aproveitamento do solo, proteção do solo, proteção contra ervas daninhas, etc.

(3) Agentes patógenos

FONTE: EMBRAPA, 2010

Em relação à composição química da cana-de-açúcar, esta é constituída, basicamente, por água (umidade), fibras e sólidos solúveis. As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam, respectivamente, a sua composição média e os seus principais constituintes, em termos de sólidos solúveis.

Tabela 3.1 – Composição média da cana-de-açúcar

Constituinte	Teor (%)
Água	65 – 75
Fibras	8 – 14
Sólidos solúveis	12 – 23
Açúcares	11 - 18

Fonte: COPERSUCAR, 2010

Tabela 3.2 – Principais constituintes da cana-de-açúcar em termos de sólidos solúveis

Constituinte	Sólidos solúveis (%)
1 - Açúcares	75 - 93
Sacarose	70 – 91
Glicose	2 – 4
Frutose	2 – 4
2 - Sais	3,0 - 5,0
Sais de ácidos inorgânicos	1,5 – 4,5
Sais de ácidos orgânicos	1,0 – 3,0
3 - Proteínas	0,5 – 0,6
4 - Amido	0,001 – 0,05
5 - Gomas	0,3 – 0,6
6 - Ceras e graxas	0,05 – 0,15
7 - Corantes	3,0 – 5,0

Fonte: COPERSUCAR, 2010

3.2 – As Usinas Sucroalcooleiras e a Geração de Energia

O Brasil vem passando, nos últimos anos, por um desenvolvimento crescente do sistema agro-industrial da cana-de-açúcar, visando principalmente à produção de álcool como combustível.

A tabela 3.3 apresenta os dados sobre a produção brasileira de álcool, nas safras de 2001/2002 a 2006/2007.

Tabela 3.3 – Produção brasileira de álcool (em metros cúbicos) nas safras 2001/2002 a 2006/2007

Região	Safras						
	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08⁽¹⁾
Norte / Nordeste	1.359.964	1.471.141	1.723.416	1.825.786	1.508.085	1.770.726	1.988.495
Centro/ Sul	10.107.831	11.014.285	12.916.507	13.382.123	14.298.845	16.160.925	20.250.174
Total	11.467.795	12.485.426	14.639.923	15.207.909	15.806.930	17.931.651	22.238.669

(1) Posição em 04/01/2008

Fonte: Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2008)

Acompanhando o aumento crescente da produção de álcool, as Usinas têm se preocupado com o reaproveitamento dos efluentes e resíduos sólidos, também gerados de maneira crescente. É importante mencionar que, além da grande quantidade gerada, grande parte destes resíduos possui um reconhecido valor energético, o que torna o seu aproveitamento bastante proveitoso por parte das usinas.

Desta forma, apesar do bagaço de cana possuir outros possíveis destinos, como a produção de ração animal, obtenção de composto utilizado como adubo, produção de celulose, produção de aglomerados (CETESB, 2002), a principal utilização do bagaço, nas usinas de fabricação de álcool, tem sido a queima de bagaço em caldeiras para geração de energia elétrica (processo denominado como co-geração).

Segundo Paoliello (2006), o aproveitamento energético de parte destes resíduos, notadamente, o bagaço de cana, não se constitui em prática recente. A co-geração já é amplamente utilizada pelas usinas e outros setores industriais, visando, principalmente, suprir as necessidades próprias de energia. Existem usinas, inclusive que disponibilizam o excedente de energia produzida para companhias distribuidoras de energia elétrica.

Além de Paoliello (2006), vários outros autores apontam para a utilização do bagaço como fonte de energia elétrica a partir da co-geração em grande parte das usinas brasileiras, visando o consumo próprio, e eventualmente para venda do excesso produzido (Khanal *et al.*, 2008; Souza & Azevedo, 2006; Schaeffer *et al.*, 2005; Scaramucci *et al.*, 2004; Dellepiane *et al.*, 2003).

3.2.1 – Processo de produção de álcool e geração de bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é gerado como produto da moagem da cana em usinas sucroalcooleiras.

No caso da presente dissertação, o substrato estudado constituiu-se no bagaço gerado exclusivamente em uma usina de produção de álcool, sendo por este motivo, esta tipologia de usina considerada para a descrição do processo de geração do bagaço.

Desta forma, é descrito a seguir, de forma geral e sucinta, o processo de geração de bagaço de cana-de-açúcar em usinas de álcool.

Destaca-se que estas informações técnicas e operacionais foram obtidas na própria usina onde foram feitas as coletas de bagaço para esta pesquisa - Alpha Destilaria Ltda., situada no município de Cláudio / MG.

Observa-se ainda que a descrição deste processo visa à contextualização e conhecimento dos principais aspectos do processo produtivo das usinas de etanol, de forma a serem visualizadas as condições operacionais de geração do substrato estudado, bem como um melhor entendimento de toda a problemática da usina (utilização de matérias-primas, insumos, utilidades, geração de produtos, subprodutos, efluentes e resíduos). Deve ser também observado que podem ocorrer algumas variações de processo para diferentes usinas. As etapas principais da produção do etanol, no entanto, permanecerão as mesmas.

O processo produtivo se inicia com o planejamento e controle dos canaviais, onde é montado um programa de corte de acordo com a maturação da cana. Através de ensaios laboratoriais da cana plantada e disponível para colheita, são analisadas características físico-químicas específicas, e assim determinando o coeficiente de maturação. A partir dos valores obtidos para este coeficiente, há a determinação do substrato mais adequado para corte e processamento.

A colheita da cana pode ser feita de forma manual ou mecanizada. Pode ser ainda empregada a queima da cana (palha) antes de sua colheita, o que pode facilitar o trabalho manual.

A cana a ser processada é cortada em toras e carregada em caminhões específicos. Estes veículos são pesados em balança, sendo o peso da carga dado com a tara do veículo.

A cana cortada que chega à unidade industrial deve ser processada assim que possível. Segundo Cardoso (2006), de maneira geral, recomenda-se que o intervalo entre corte e moagem não ultrapasse 48 horas. É necessário um sincronismo entre o corte, transporte e moagem, uma vez que este material constitui-se em uma matéria prima de fácil deterioração e sujeita a contaminações.

Segundo Paoliello (2006), o processo industrial de fabricação de álcool evolve as seguintes etapas: extração do caldo, tratamento do caldo, fermentação, destilação, retificação e desidratação, estas duas últimas dependendo do produto final vendido na usina. Deve ser observado que é na primeira etapa mencionada (extração do caldo), que é gerado o bagaço.

Visando apenas uma contextualização do processo de produção de álcool e o momento de geração do bagaço de cana-de-açúcar neste processo, a figura 3.1, a seguir, apresenta um fluxograma ilustrativo geral das etapas de fabricação de álcool, com destaque para a etapa onde é gerado o bagaço.

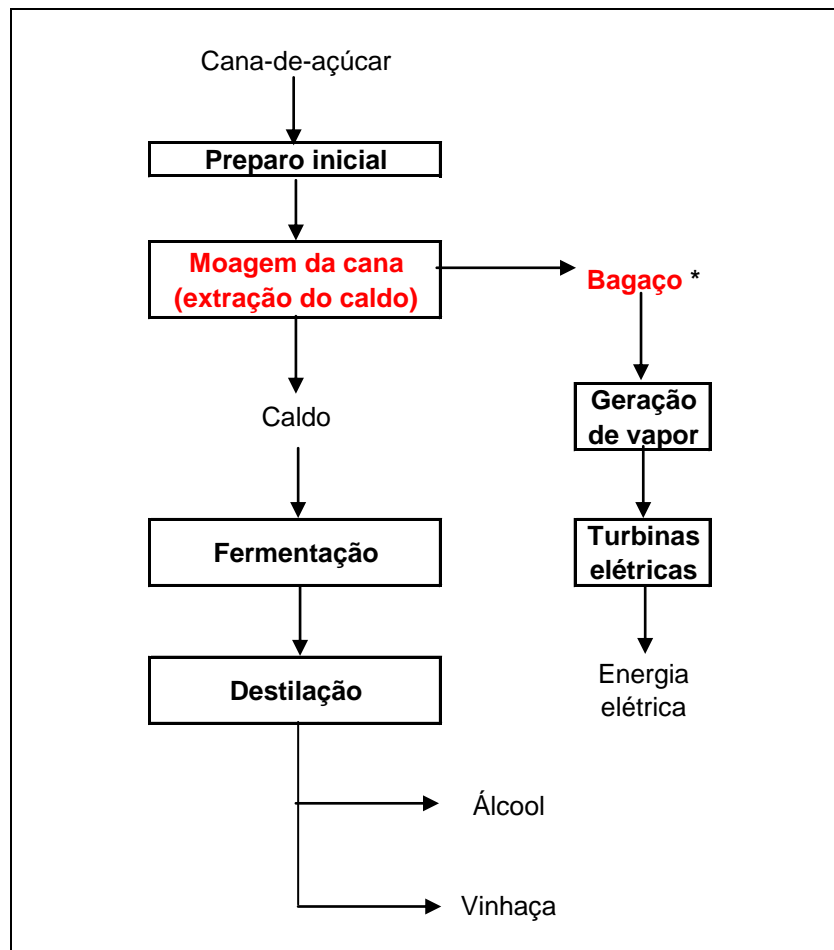


Figura 3.1 – Fluxograma ilustrativo das etapas do processo de fabricação de álcool – destaque para a etapa geradora de bagaço de cana

Fonte: Adaptado de Paoliello (2007)

* Geração de cerca de 280 kg / tonelada de cana-de-açúcar moída (Silva *et al.*, 2007)

Na unidade industrial, a cana passa, primeiramente, por uma etapa de preparação, onde é lavada com água, para retirada de impurezas, como a terra proveniente da lavoura. Esta lavagem ocorre através do basculamento da carga em uma *mesa alimentadora* disposta a um ângulo específico, a qual é submetida a uma corrente contínua de água de lavagem. Esta água é recirculada continuamente no processo. O seu descarte ocorre periodicamente juntamente com outros subprodutos do processo (vinhaça), para irrigação e fertilização das próprias plantações.

A cana lavada é então conduzida por esteira metálica até uma etapa de corte e picotagem, através de instrumentos como facas rotativas e desfibradores. Esta etapa é necessária para trituração dos colmos da cana, preparando-a para a etapa de moagem. Neste processo de corte e picotagem, os colmos da cana são abertos sem perda de caldo.

O material cortado e picotado é conduzido através de esteira específica, passando por eletroímã, para retirada de impurezas metálicas, porventura incorporadas à cana. Após a retirada das impurezas, a cana é enviada à moenda para moagem e extração do caldo.

A cana é introduzida, nas moendas, na forma de massa compacta fina, para obtenção do caldo. Durante esta operação, a cana é conduzida para passagem entre rolos sucessivos (moendas sucessivas), submetidos a uma pressão específica, acarretando na extração do caldo. Nesta etapa, anteriormente à primeira moenda, bem como entre as demais moendas, ocorre a adição de água no processo. Este procedimento de embebedimento da cana com água visa um melhor rendimento na extração do caldo.

Na medida em que o caldo é extraído, o mesmo é separado e conduzido para peneiramento (para eliminação de partículas grosseiras), podendo ainda passar por correção de pH e decantação, dependendo do processo. Este caldo, denominado caldo mosto, segue para a próxima etapa do processo de fabricação etanol. Já o bagaço gerado em toda a moagem é recolhido por correia transportadora e conduzido diretamente para queima em forno (co-geração de energia). O excedente de bagaço é estocado ao ar livre, para queima futura, em caso de necessidade.

O bagaço gerado, proveniente das moendas, apresenta em geral um teor reduzido de açúcar, e uma umidade de cerca de 50%. O bagaço apresenta crucial importância na unidade industrial, uma vez que é o combustível para todo o processo produtivo. A queima do bagaço no forno acarreta na geração de energia térmica, que por sua vez gera vapor na(s) caldeira(s). O vapor gerado aciona os turbogeradores para produção de energia elétrica. A energia elétrica gerada é consumida no próprio empreendimento.

Observa-se que, atualmente, parte das usinas brasileiras de etanol não somente utiliza o bagaço como fonte de energia elétrica a partir da co-geração (consumo próprio), como também, eventualmente, vendem o excesso de energia produzido (Khanal *et al.*, 2008; Souza & Azevedo, 2006; Schaeffer *et al.*, 2005; Scaramucci *et al.*, 2004; Dellepiane *et al.*, 2003).

O caldo mosto, por sua vez, segue para a etapa de fermentação, cujo processo geralmente adotado é o de Melle Boinot, segundo Paoliello (2006). Nesta etapa, o caldo mosto é conduzido para o interior de estruturas denominadas dornas, onde é adicionada uma levedura específica que realiza a fermentação alcoólica. Desta forma, na fermentação ocorre a transformação dos açúcares (sacarose) em álcool etílico. Durante a conversão dos açúcares em

etanol há desprendimento de gás carbônico e calor, de forma que as dornas devem possuir estrutura física fechada, e assim possibilitar a recuperação do álcool arrastado pelo gás carbônico.

Pode ainda ser necessário o uso de trocadores de calor para manter a faixa de temperatura nas condições ideais para as leveduras. Esta faixa de temperatura ideal depende do tipo de levedura utilizada. O mosto fermentado é chamado de vinho. O tempo de fermentação é variável, podendo oscilar de 6 a 10 horas.

O produto da fermentação segue para a etapa de centrifugação, onde ocorre a separação do vinho e do fermento. O vinho segue para a etapa subsequente do processo, a destilação, onde o álcool é separado, concentrado e purificado. Já o fermento recuperado é enviado para tratamento específico, de onde é realimentado na etapa de fermentação.

Na destilação, ocorre a separação do etanol (álcool hidratado) e da vinhaça, sendo em menor quantidade obtido o denominado óleo fusel. O óleo fusel se constitui na fração menos volátil obtida durante o processo de destilação, sendo o seu constituinte principal o álcool isoamílico.

O álcool hidratado obtido pode ainda passar por uma etapa de desidratação específica, para obtenção do álcool anidro.

A vinhaça, também subproduto da destilação, possui elevado teor de matéria orgânica, água, e variável teor de nutrientes (Khanal *et al*, 2008), geralmente com elevada concentração de nitrogênio, potássio e fósforo, sendo comumente utilizada para irrigação e fertilização das áreas de plantio de cana.

Deve ser observado que após a finalização de cada etapa do processo, são feitas análises físico-químicas periódicas para controle de qualidade do caldo mosto, do vinho, bem como do produto final – etanol, obtidos.

Estando o produto final em conformidade, o mesmo é bombeado para tanque de estocagem, de onde será carregado em caminhões, para expedição.

3.2.2 – Bagaço de cana-de-açúcar como potencial gerador de energia

Em termos de composição química, os constituintes do bagaço de cana-de-açúcar se assemelham aos da própria cana-de-açúcar, porém em percentuais distintos: quantidades bem

menos significativas de sólidos solúveis, e consequentemente teores de açúcar bastante reduzidos.

Segundo Silva *et al.* (2007), a composição química do bagaço varia conforme o tipo de solo de plantio, técnicas de colheita e seu manuseio. No entanto, pode-se admitir uma composição média característica do bagaço como 46% de fibras, 50% de umidade, 2% de brix (sólidos solúveis em água) e 2% de minerais. A constituição das fibras, por sua vez, também pode variar: celulose (26,6 a 54,3%), hemiceluloses (14,3 a 24,4%) e lignina (22,7 a 29,7%). Pandey *et al.* (2000) admite uma composição de fibras de 50% de celulose, 25% de hemiceluloses e 25% de lignina, o que se aproxima da composição média mencionada por Silva. Já em relação às cinzas, embora a grande maioria das referências pesquisadas apresente um percentual bastante reduzido para este parâmetro, Jenkins (1990) apud Cortez *et al.* (2008), reconhecem um percentual de cerca de 11% de cinzas, considerando-se, no entanto, a composição imediata da biomassa em base seca.

Considerando-se ainda a composição do bagaço de cana em termos de elementos químicos, Silva *et al.* (2007) também apresenta dados médios característicos: carbono (39,7 a 49%), oxigênio (40 a 46%), hidrogênio (5,5 a 7,4%), nitrogênio e cinzas (0 a 0,3%).

A tabela 3.4 apresenta, de forma esquemática, a composição química média do bagaço de cana.

Tabela 3.4 – Composição química média do bagaço de cana-de-açúcar (em massa)

Composição química média	
Umidade	50%
Fibras	46%
Sólidos solúveis	2%
Impurezas minerais	2%
Composição média das fibras	
Celulose	26,6 – 54,3%
Hemicelulose	14,3 – 24,4%
Lignina	22,7 – 29,7%
Composição química elementar média	
Carbono	39,7 – 49%
Oxigênio	40 – 46%
Hidrogênio	5,5 – 7,4%
Nitrogênio e cinzas	0 – 0,3%

Fonte: Silva *et al.* (2007)

A composição essencialmente orgânica do bagaço de cana permite que ele seja uma fonte potencial de geração de energia. Esta característica, aliada ao fato de que este material é

gerado em quantidades significativas nas usinas sucroalcooleiras, faz ampliar a sua aplicabilidade para esta finalidade (Schaeffer *et al.*, 2005).

Em termos de quantidade gerada, segundo Silva *et al.* (2007), o bagaço de cana-de-açúcar constitui-se no resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil, sendo estimado em 280 kg / tonelada de cana moída. Este número se aproxima da estimativa feita por Scaramucci *et al.*, 2004, onde aproximadamente 270 kg de bagaço são obtidos pelo processamento de 1 (uma) tonelada de cana, considerando-se a produção de açúcar e etanol no ano base de 1996; bem como da estimativa de 250 a 260 kg / tonelada de cana mencionada por Paoliello (2006).

A quantidade total de bagaço de cana gerado é ainda bastante significativa, considerando-se que, segundo UNICA e MAPA (2009), a cana-de-açúcar processada no Brasil, durante a safra 2008/2009, foi estimada em 569.062.129 toneladas.

3.2.2.1 – Bagaço de cana-de-açúcar e a co-geração de energia elétrica

Segundo Coelho (1999), a co-geração constitui-se na geração simultânea de energia térmica e mecânica, a partir de um mesmo combustível (gás natural, resíduos de madeira, casca de arroz, bagaço de cana, palha, etc.). A energia mecânica obtida pode ser utilizada na forma de trabalho ou transformada em eletricidade, através de geradores. Já a energia térmica pode ser utilizada como fonte de calor em um processo industrial, ou no setor de comércio / serviços.

Alguns autores, como Oddone (2002) e Coelho (1999), abordam os aspectos termodinâmicos da obtenção de eletricidade através da co-geração na cadeia sucroalcooleira, em especial o ciclo Rankine e o ciclo combinado. No ciclo Rankine, utiliza-se uma caldeira, onde o bagaço é alimentado como fonte de energia, gerando vapor em alta pressão, com temperatura superior ao ponto de ebulição da água. A liberação do vapor ocorre através de sistemas mecânicos, movimentando máquinas, e transferindo calor para processos industriais, ou movimentando turbinas para geração de energia elétrica. O ciclo se completa com o retorno do vapor condensado à caldeira, para ser novamente aquecido. Já no ciclo combinado, uma turbina a gás, em alta temperatura, movimenta um gerador, sendo transferido o calor do gás para água, que é vaporizada. A água vaporizada aciona um segundo gerador. Em ambos os geradores há produção de energia elétrica.

A figura 3.2 apresenta, de forma ilustrativa, um desenho esquemático do processo de co-geração.

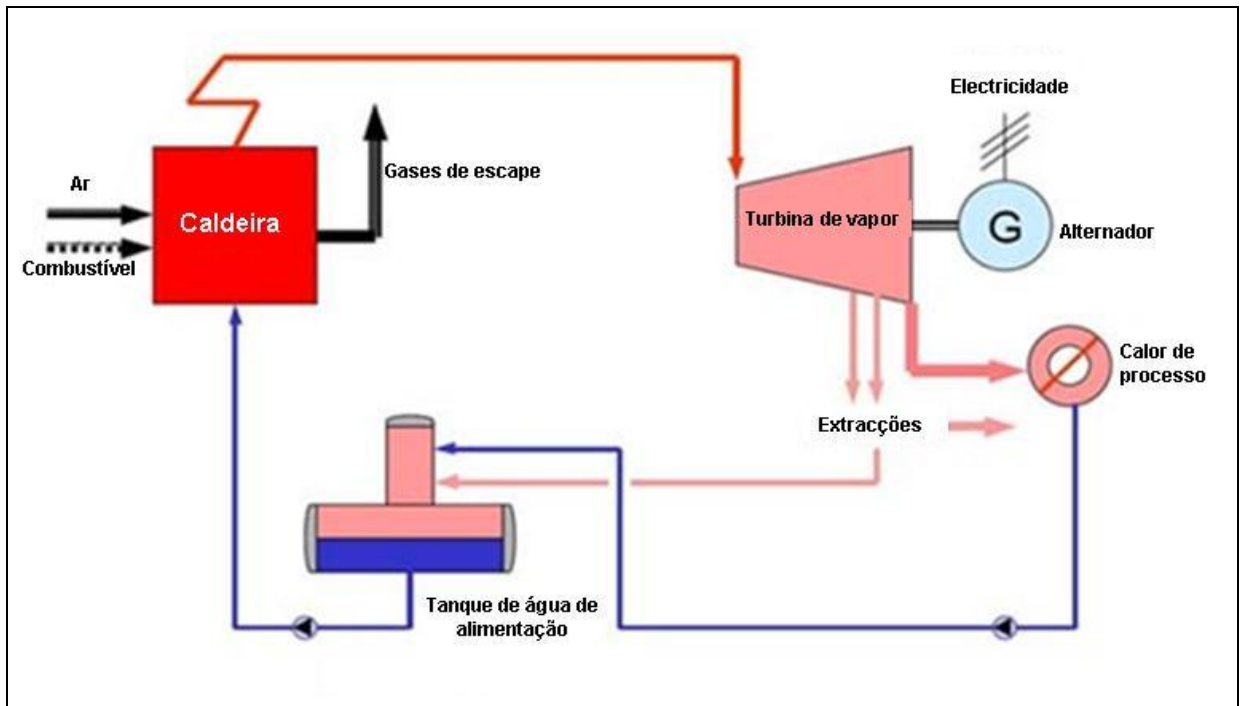


Figura 3.2- Desenho esquemático do processo de co-geração simples

FONTES: COGEN PORTUGAL (2010)

Segundo Souza & Azevedo (2006), o potencial de geração de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro está relacionado diretamente à tecnologia empregada, devido ao fato de que os custos unitários (R\$ / kW instalado) serem influenciados pelo efeito escala. O tipo de caldeira utilizada para a queima do bagaço (caldeiras de pressão mais elevada – 40 a 100 bar), bem como a utilização de turbinas de múltiplo estágio, podem elevar, de forma significativa, a eficiência energética do processo.

Segundo dados da ANEEL (2010), considerando-se as classes de combustíveis utilizados no Brasil – biomassa, fóssil e outros, a biomassa, na geração termelétrica, representa 26,9 % da potência gerada, considerando-se os empreendimentos já em operação. Para os empreendimentos em construção, este percentual subiria para 30,29 %.

Por sua vez, em relação aos combustíveis considerados como biomassa, segundo dados também da ANEEL (2006), quais sejam – bagaço de cana-de-açúcar, licor negro, resíduos de madeira, biogás, carvão vegetal e casca de arroz – o bagaço de cana representa nada menos do que 78,07 % da potência gerada, considerando-se os empreendimentos já em operação. Para os empreendimentos em construção, este percentual sobe para 90,63 %.

Por outro lado, devido às dificuldades de armazenamento e conservação do bagaço (material muito volumoso, gerado em quantidades significativas) as quais podem propiciar sua degradação; da sazonalidade de produção das usinas sucroalcooleiras; do limite de transmissão dentro de um “pool” de energia; e da grande sensibilidade dos custos marginais em relação à quantidade produzida, a energia elétrica obtida pela co-geração tende a apresentar uma grande volatilidade de preços (Pokalsky & Robinson, 1997; Burchett & Moffat, 1997). Estes fatos contribuem para uma certa inviabilidade de produção de energia para fins comerciais, sendo esta produção vantajosa, particularmente, para o consumo interno das próprias usinas.

Em virtude das dificuldades acima relacionadas, segundo Souza & Azevedo (2006), a geração de energia elétrica por parte do setor sucroalcooleiro se encontra muito aquém do seu potencial. Segundo este autor, “*mediante a adoção de tecnologias disponíveis de co-geração a partir do bagaço e da palha, apenas a produção de excedente de energia por parte das usinas paulistas seria capaz de suprir o déficit de toda a região Sudeste, por ocasião do racionamento, durante a crise de 2001-2002*”.

Considerando-se, por sua vez, as características do bagaço como combustível, segundo Paoliello (2006), podem ser mencionadas:

- Produção de bagaço por tonelada de cana processada: 250 a 280 kg / t cana (considerando-se as referências Silva *et al.* (2007); Scaramucci *et al.* (2004); e Paoliello (2006)).
- Energia útil contida no vapor gerado: 1.147 kcal/kg de bagaço
- Produção de vapor por kg de bagaço: 1,9 kg vapor/kg bagaço
- Poder calorífico superior do bagaço seco: 4.600 kcal/kg
- Poder calorífico inferior do bagaço seco: 4.250 kcal/kg.

3.3 – Alternativas para geração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar e seu melhor aproveitamento

Pesquisas recentes têm sido realizadas visando um melhor aproveitamento da geração de energia a partir do bagaço de cana, como uma alternativa à co-geração. Neste sentido, são verificados estudos como a produção de etanol a partir do bagaço, e rotas de pré-tratamento químico e enzimático do mesmo, visando à quebra das fibras celulósicas, facilitando seu

processo de fermentação. Apesar de promissores, a grande maioria destes processos ainda não está totalmente maturada e está associada a custos operacionais elevados, o que, para a maioria das usinas geradoras de bagaço, ainda não é considerado como uma tecnologia viável (Khanal *et al.*, 2008).

Como forma de se otimizar o aproveitamento energético do bagaço de cana, pode ainda ser considerado o processo de biodigestão anaeróbia, que possibilita a produção de biogás a partir de biomassa em geral. A biodigestão anaeróbia é considerada uma tecnologia já estabelecida e de menor custo operacional.

Neste sentido, a tecnologia patenteada por Busch & Sieber (2006), de biodigestão em duplo estágio de materiais biogênicos, surge como uma possibilidade de geração de biogás a partir do bagaço de cana, o qual poderá ser convertido em energia. Esta tecnologia poderá ser aplicada em conjunto com a co-geração atualmente praticada.

Observa-se que, segundo Busch (2008), a tecnologia patenteada apresentando resultados positivos para a produção de biogás, com percentuais de metano mais elevados do que percentuais obtidos por outros métodos de biodigestão já conhecidos. Desta forma, as concentrações remanescentes de açúcar e outras substâncias orgânicas solúveis, ainda presentes no bagaço (os quais possuem elevado potencial de biodigestão), podem ser processadas por esta tecnologia. Uma outra vantagem constitui-se no baixo teor de cinzas do bagaço, o que é um fator positivo para o seu processamento por biodigestão por culturas de microrganismos (Socol & Vandenberghe, 2003).

Além disso, conforme estudos já realizados pelo detentor da patente, há ainda a possibilidade de decomposição de parte das hemiceluloses e celulose, de mais difícil degradação. De acordo com resultados experimentais obtidos para esta tecnologia, as hemiceluloses podem apresentar um percentual de decomposição oscilando de moderado a bom, enquanto para a celulose este percentual pode variar de ruim a moderado.

3.4 - Biodigestão Anaeróbia de Materiais Orgânicos aplicada à Geração de Energia

3.4.1 – Conceitos gerais e fundamentos da biodigestão anaeróbia

Segundo Mota (1997), os ciclos biogeoquímicos (ou ciclo dos elementos na biosfera), se constituem na transformação cíclica e contínua da matéria, com o aproveitamento energético

(fluxo de energia) através da cadeia trófica e um contínuo intercâmbio de elementos químicos entre o meio biótico e o abiótico.

Estas transformações da matéria, por sua vez, ocorrem basicamente devido à realização dos processos de síntese e decomposição de materiais orgânicos, através dos organismos autótrofos fotossintetizantes; e organismos heterótrofos, consumidores ou decompositores, respectivamente.

Desta forma, os processos de decomposição de materiais orgânicos surgem como processos naturais, parte integrante dos ciclos biogeoquímicos. Segundo Buekens (2005), a biodigestão de matéria orgânica se constitui em um processo natural, de ocorrência espontânea, onde há a transformação de compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples, como metano, dióxido de carbono, água, dentre outros, através da ação combinada de diferentes microrganismos.

A decomposição da matéria orgânica pode ocorrer por via aeróbia (oxidação completa dos compostos orgânicos, tendo o oxigênio como receptor de elétrons), ou por via anaeróbia (decomposição na ausência de oxigênio molecular, onde nitratos, sulfatos e dióxido de carbono se constituem nos receptores de elétrons). Enquanto na biodigestão aeróbia a matéria orgânica é convertida, basicamente, em dióxido de carbono, água e sais minerais, no processo anaeróbio há o favorecimento de uma estabilização da matéria orgânica com formação de compostos como o metano e o dióxido de carbono, em detrimento da água.

Desta forma, a estabilização anaeróbia da matéria orgânica possibilita a transformação de um material orgânico complexo em compostos como o biogás, que possui reconhecidas propriedades energéticas.

A produção de compostos com propriedades energéticas, como o biogás, fez com que os fundamentos da biodigestão anaeróbia passassem a ser aplicados, na área da engenharia ambiental, na concepção de sistemas de tratamento específicos de águas residuárias, aterros de resíduos sólidos e biodigestores, visando ao aproveitamento destes combustíveis.

Segundo Chernicharo (2007), em termos de processo metabólico, a digestão anaeróbia envolve etapas sequenciais de metabolismo complexo, as quais dependem de, no mínimo, três (03) grupos fisiológicos distintos de microrganismos. A saber:

- Processo metabólico 01 - Hidrólise e acidogênese: ação de bactérias fermentativas ou acidogênicas;
- Processo metabólico 02 - Acetogênese: ação de bactérias sintróficas ou acetogênicas;
- Processo metabólico 03 – Metanogênese: ação de microrganismos metanogênicos.

Inicialmente, na etapa denominada hidrólise / acidogênese, ocorre a conversão de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas, lipídios) em compostos mais simples (ácidos orgânicos – principalmente, hidrogênio e dióxido de carbono), através da hidrólise e fermentação. Este processo de conversão se inicia com a transformação da matéria orgânica particulada mais complexa em materiais dissolvidos, por meio da ação de exoenzimas específicas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Os materiais dissolvidos podem ser mais facilmente assimilados pelos microrganismos.

Em relação às bactérias com capacidade hidrolítica no processo de digestão anaeróbia, existem diferentes gêneros de microrganismos que podem estar predominantes no meio. Conforme Chernicharo (2007), a composição relativa e ativas destes microrganismos será refletida pelo tipo de substrato presente no sistema.

Após a hidrólise da matéria orgânica, os compostos solúveis produzidos são então metabolizados no interior das células bacterianas, através do metabolismo fermentativo. Segundo Chernicharo (2007), os microrganismos fermentativos são os primeiros a atuar na etapa sequencial de degradação do substrato, e são os que mais se beneficiam energeticamente. Desta forma, a etapa acidogênica só é considerada como limitante do processo se o material a ser degradado não for facilmente hidrolisável.

Na etapa metabólica seguinte, denominada acetogênese, as bactérias sintróficas (ou acetogênicas), realizam a conversão de compostos orgânicos intermediários (propionato, butirato) em compostos também mais simples (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono). Estes servirão como substrato apropriado para os microrganismos metanogênicos.

A metanogênese, etapa final do processo global de conversão anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, é realizada pelos microrganismos metanogênicos. Estes microrganismos, classificados dentro do domínio Archaea (grupo distinto das bactérias típicas), promovem a conversão do acetato e hidrogênio produzidos nas etapas anteriores, em metano e dióxido de carbono.

As arqueas metanogênicas são constituídas por microrganismos anaeróbios estritos, os quais utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo o ácido acético, hidrogênio / dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Segundo ainda mencionado por Chernicharo (2007), estes microrganismos desempenham um papel fundamental em ambientes anaeróbios, uma vez que são responsáveis pela manutenção da pressão parcial de hidrogênio, no meio, em níveis suficientemente reduzidos, e, conseqüentemente, tornando favoráveis as reações efetivadas pelas bactérias acetogênicas (produtos solúveis mais oxidados), que são substrato para a própria metanogênese.

A figura 3.3 apresenta um desenho esquemático das rotas metabólicas envolvidas no processo de digestão anaeróbia.

Observa-se que, devido à ausência de enxofre no substrato tratado na presente pesquisa, não está sendo considerada qualquer rota de processo referente à sulfetogênese (redução de sulfatos a sulfetos).

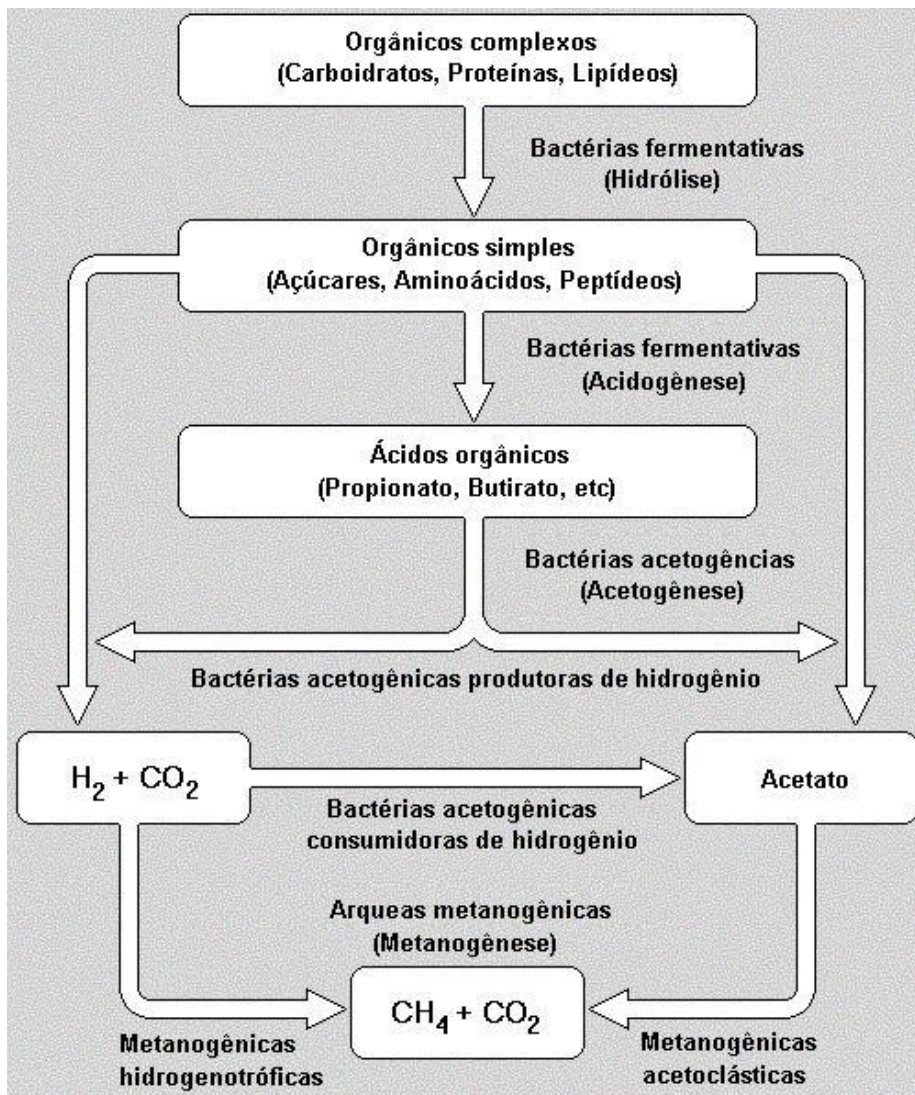


Figura 3.3 - Desenho esquemático das rotas metabólicas envolvidas no processo de digestão anaeróbia

FONTE: Chernicharo (2007)

A ocorrência, de maneira satisfatória, das etapas de biodigestão anaeróbia, depende de uma série de fatores ambientais para o desenvolvimento e sobrevivência de todos os microrganismos envolvidos, tais como: temperatura, pH e presença de nutrientes. A presença excessiva de alguns elementos pode ainda acarretar em uma toxicidade do meio, inviabilizando o processo.

Em relação à temperatura, esta se constitui em um dos principais parâmetros determinantes da seleção das espécies envolvidas no processo de digestão. A temperatura do ambiente é que determina a temperatura interna das células dos microrganismos.

Segundo Batstone *et al.* (2002), existem três faixas de temperatura que podem ser associadas ao crescimento microbiano, na maioria dos processos biológicos. São elas:

- Faixa de temperatura psicrófila (Arqueas metanogênicas psicrófilas): entre 4 e aproximadamente 15 °C
- Faixa de temperatura mesófila (Arqueas metanogênicas mesófilas): entre 20 e aproximadamente 40 °C
- Faixa de temperatura termófila (Arqueas metanogênicas termófilas): entre 45 e 70 °C, e acima deste valor.

A figura 3.4 representa, graficamente, a influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento das arqueas metanogênicas. Através do gráfico podem ser observadas, para cada faixa, as temperaturas ótimas (crescimento máximo dos microrganismos), bem como as temperaturas mínimas e máximas, onde abaixo ou acima das quais, respectivamente, o processo de seu crescimento é inibido.

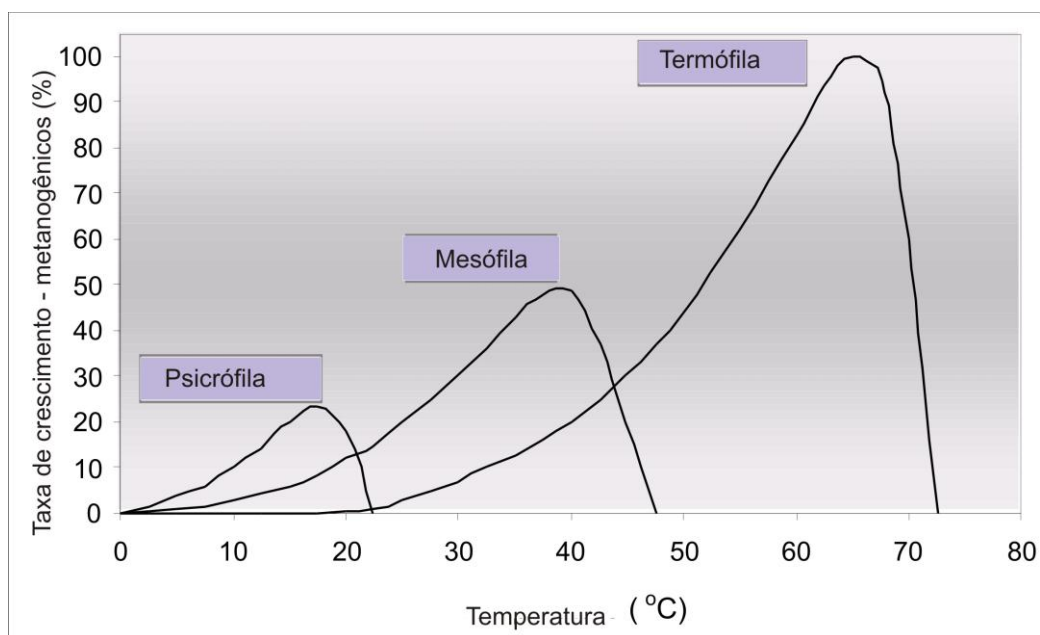


Figura 3.4 – Taxas relativas de crescimento das arqueas metanogênicas em função da temperatura

FONTE: Chernicharo (2007)

Segundo Bekkering *et al.* (2010), as temperaturas mesofílicas e termofílicas são mais comumente aplicadas aos processos de digestão. Entre estas duas temperaturas, alguns estudos apontam que há alguma evidência de que a produção de metano total é ligeiramente superior, em um processo mesofílico. No entanto, em relação ao tempo de retenção no reator, este é geralmente inferior em um processo termofílico (Parawira *et al.*, 2007). Em termos econômicos, considerando-se, por sua vez, que o calor necessário para a manutenção da temperatura no sistema está relacionado também a um consumo de energia, é imprescindível a

consideração do balanço de energia líquida entre o aumento da energia demandada para aquecimento e a uma eventual melhoria da produção de metano, em altas temperaturas. Estas considerações são necessárias para que seja estabelecida a temperatura de digestão mais econômica.

Segundo Igoni *et al.* (2008), a digestão termofílica não tem sido bem sucedida, na prática, porque os microrganismos termófilos são mais sensíveis a pequenas mudanças de temperatura. Já a digestão psicrófila também não se torna adequada para digestão anaeróbia pelo fato de que a degradação de ácidos-graxos de cadeia longa serem frequentemente um fator limitante para o processo. O seu acúmulo, no digestor, pode ocasionar a formação e acúmulo de espuma, inibindo a continuidade do processo.

Considerando-se o parâmetro pH, o qual está intimamente relacionado à alcalinidade e ácidos voláteis, o seu efeito sob o processo de digestão anaeróbia se manifesta através de duas formas principais, conforme Lettinga *et al.* (1996) apud Chernicharo (2007): afetando, diretamente, a atividade de enzimas ou, indiretamente, afetando a toxicidade de alguns compostos.

Desta forma, os diferentes microrganismos presentes no processo de digestão anaeróbia possuem faixas ótimas de pH, bem como faixas onde sua atividade pode ser inibida. A tabela 3.5 apresenta as faixas ideais de pH segundo as etapas da digestão.

Tabela 3.5 – Faixas ótimas de pH para as diferentes etapas da biodigestão anaeróbia

Hidrólise / Acidogênese	Acetogênese / Metanogênese
4,5 – 6,3	6,8 – 7,2

FONTE: BUSCH (2008)

Segundo Busch (2008), na etapa de hidrólise e acidogênese, as bactérias envolvidas podem sobreviver fora desta faixa de pH. Já os microrganismos presentes nas etapas de acetogênese e metanogênese, têm seu crescimento e atividade inibidos, ou mesmo são eliminados, fora desta faixa de valores.

Ainda segundo Busch (2008), em um processo de digestão em estágio único, um valor de pH inferior a 6,5 pode significar a falência do sistema, uma vez que o consumo dos ácidos orgânicos será diminuído, enquanto estes mesmos compostos continuarão sendo produzidos nas etapas anteriores. O pH tenderá a uma queda ainda maior, impossibilitando o crescimento dos microrganismos envolvidos na produção de metano.

Em relação à presença de nutrientes, as necessidades nutricionais das populações microbianas são estabelecidas a partir da composição química empírica de suas células (Chernicharo, 2007). A tabela 3.6 apresenta a composição química das arqueas metanogênicas.

Tabela 3.6 – Composição química das arqueas metanogênicas

Macronutrientes		Micronutrientes	
Elemento	Concentração (g/kg SST ⁽¹⁾)	Elemento	Concentração (mg/kg SST ⁽¹⁾)
Nitrogênio	65	Ferro	1.800
Fósforo	15	Níquel	100
Potássio	10	Cobalto	75
Enxofre	10	Molibdênio	60
Cálcio	4	Zinco	60
Magnésio	3	Manganês	20
		Cobre	10

(1) SST: sólidos totais

FONTE: Lettinga *et al.* (1996) apud Chernicharo (2007)

Visando um processo biológico satisfatório, os nutrientes inorgânicos devem ser fornecidos em quantidades suficientes aos microrganismos, possibilitando seu crescimento. Segundo Chernicharo (2007), há a seguinte relação de importância dos nutrientes para as arqueas metanogênicas, em ordem decrescente: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12.

Conforme Lettinga *et al.* (1996) apud Chernicharo (2007), com base nas concentrações de nutrientes nas células, as necessidades mínimas de nutrientes podem ser calculadas através da expressão:

$R_n = DQO_{afl} \times Y \times N_{bac} \left(\frac{SST}{SSV} \right)$, onde:

- R_n : requisito de nutriente (g/L)
- DQO_{afl} : concentração da DQO afluente (g/L)
- Y : coef. de produção de biomassa (gSSV/gDQO)
- N_{bac} : concentração de nutriente na célula (g/gSSV)
- SST/SSV: relação sólidos totais / sólidos voláteis da célula (usualmente 1,14)

Considerando-se ainda os três elementos mais importantes, nitrogênio, enxofre e fósforo, existe uma correlação reconhecida entre os parâmetros Demanda Química de Oxigênio – DQO, nitrogênio e fósforo, vinculados ao crescimento da biomassa (coeficiente de produção celular):

- Relação - DQO : N : P
 - 350 : 5 : 1 (biomassa com elevado crescimento – $Y \sim 0,15$)
 - 1000 : 5 : 1 (biomassa com baixo crescimento $Y \sim 0,05$)

Já as necessidades do elemento enxofre, podem ser consideradas como da mesma ordem de grandeza das necessidades do fósforo.

Finalmente, com relação aos compostos que conferem toxicidade ao meio, inibindo ou eliminando o crescimento e atividade microbiana, podem ser citados cátions de sais inorgânicos dissolvidos (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , dentre outros), amônia, sulfeto, metais pesados, outras toxinas inorgânicas (cianeto) e orgânicas (detergentes e pesticidas) (Libânio, 2002).

As tabelas 3.7 e 3.8 apresentam, respectivamente, concentrações estimuladoras e inibidoras de alguns cátions, e efeitos da amônia livre sobre os processos anaeróbios.

Tabela 3.7 – Concentrações estimuladoras e inibidoras de alguns cátions

Cátion	Concentração (mg/L)		
	Estimuladora	Moderadamente inibidora	Fortemente inibidora
Cálcio	100 a 200	2500 a 4500	8000
Magnésio	75 a 150	1000 a 1500	3000
Potássio	200 a 400	2500 a 4500	12000
Sódio	100 a 200	3500 a 5500	8000

FONTE: McCarty (1964) apud Chernicharo (2007)

Tabela 3.8 – Efeitos da amônia livre sobre os processos anaeróbios

Concentração, como N (mg/L)	Efeito
50 a 200	Benéfico
200 a 1000	Não tem efeito adverso
1500 a 3000	Inibidor para pH > 7,4 a 7.6
Acima de 3000	Tóxico

FONTE: McCarty (1964) apud Chernicharo (2007)

3.4.2 - Características e tipos de processos controlados de biodigestão anaeróbia

Segundo Buekens (2005), a implementação do mecanismo de biodigestão anaeróbia de maneira controlada, visando à produção de biogás, pode ser feita de acordo com uma variedade de processos, os quais podem ser caracterizados segundo o tipo de regime, o número de estágios de processo e o percentual de sólidos no substrato a ser digerido.

Quanto ao tipo de regime, podem ser empregados processos em batelada ou contínua.

No regime em batelada, o substrato é mantido selado, no interior de um tanque digestor, por um determinado período de retenção. Durante este período, deverá ocorrer o processo completo de digestão. Conforme Buekens (2005), devido à ausência de agitação ou mistura do substrato, o conteúdo do digestor apresentará uma estratificação em camadas, incluindo gás, espuma, sobrenadante, uma camada reativa, e sólidos estabilizados no fundo do tanque. Como desvantagens do processo em batelada, tem-se um período mais longo de retenção, as baixas taxas de carregamento de substrato (matéria orgânica), bem como a formação de uma camada de espuma.

Já os processos contínuos em regime permanente, segundo Levenspiel (2000), podem ser modelados na forma de escoamento pistonado ou escoamento de mistura perfeita. No primeiro caso, o fluido passa através do reator, sem haver mistura entre o fluido recém alimentado e aquele já existente no reator. No escoamento com mistura perfeita, o fluido é uniformemente misturado, sendo a sua composição semelhante no interior e na saída do reator. Idealmente, este processo ocorre sob um regime uniforme, e, portanto com uma produção de biogás constante (Buekens, 2005).

Considerando-se o número de estágios, há a biodigestão controlada em estágio único, em duplo estágio ou em múltiplos estágios. Estas alterações de design no aparato digestor possibilitam a otimização das sucessivas fases da digestão, cada qual sob condições distintas de operação.

Conforme Buekens (2005), no processo de estágio único, todas as tipologias de microrganismos digestores estão presentes em um mesmo espaço físico (mesmo ambiente) estando, portanto, sujeitos à sobrevivência nas mesmas condições operacionais do meio, tais como pH e temperatura. Neste caso, apesar destas condições operacionais não serem ideais e específicas para cada tipo de bactéria, as mesmas são consideradas aceitáveis para todos os

tipos de organismos existentes, o que faz com que haja um equilíbrio entre suas taxas de crescimento. Entretanto, estas condições operacionais “comuns” não acarretarão em uma otimização das atividades de cada grupo de microrganismos, não sendo otimizada, desta forma, a produção de biogás. Em processos de estágio único o pH, parâmetro crucial para o processo, é mantido próximo da neutralidade (pH = 7,0), visando assegurar a sobrevivência das arqueas metanogênicas, mais sensíveis a este parâmetro.

Segundo Gunaseelan (1997), há implementações do processo em único estágio, onde dois digestores semelhantes são colocados em série, para passagem do substrato. Neste aparato, o substrato residual da primeira fase pode ser digerido no segundo digestor, onde ocorrem as mesmas reações da primeira fase, porém com um tempo de retenção diferente. Este processo se difere da digestão em duplo estágio: neste, ocorre a separação das etapas de biodigestão hidrólise/acidogênese, e acetogênese/metanogênese, cada qual com reações químicas e grupos de microrganismos predominantes totalmente distintos.

Em relação ao processo de digestão de múltiplo estágio, o substrato a ser digerido passa, progressivamente, através de câmaras sequenciais de digestão anaeróbia. Cada câmara representa, neste caso, estágios distintos da digestão.

Os processos em estágios múltiplos começaram a ser desenvolvidos ainda nos anos cinquenta. Segundo Chernicharo (2007), o reator anaeróbio de duas fases foi desenvolvido visando o tratamento de despejos industriais concentrados. O sistema incorpora a utilização de um primeiro tanque de mistura completa (reator anaeróbio), interconectado a um dispositivo que propicia a separação e o retorno de sólidos. Neste processo, parte da biomassa floculada no reator, em conjunto com o material sólido não digerido, arrastados para fora do sistema, podem ser retidos e retornados ao reator inicial (tanque de mistura), onde são novamente misturados com o substrato afluente, para biodigestão.

Ao longo do tempo os sistemas de múltiplos estágios foram passando por melhorias de concepção, permitindo uma otimização contínua da digestão anaeróbia, bem como uma crescente preocupação não somente com o tratamento dos substratos em si, como também a utilização do biogás produzido.

Segundo Buekens (2005), em processos de duplo estágio ocorre a utilização de duas câmaras de digestão, onde a primeira câmara deve contemplar, usualmente, as etapas de hidrólise e acidogênese, enquanto a segunda abriga a acetogênese e metanogênese. Em cada câmara são

otimizadas as condições operacionais das diferentes etapas de digestão, proporcionando, desta forma, condições de desenvolvimento específicas para os diferentes microrganismos, e conseqüentemente otimizando as etapas de biodigestão e produção de biogás.

Nos processos em duplo estágio, atualmente, conforme Buekens (2005), a primeira câmara é aquecida a uma determinada temperatura, que é mantida uniforme. O substrato a ser digerido é alimentado e continuamente misturado no interior da câmara. Nesta etapa, o pH tende a apresentar uma ligeira queda em seus valores, devido à formação dos ácidos orgânicos.

Após um tempo de residência específico do substrato, nesta primeira câmara, o mesmo é conduzido para segunda câmara de digestão, na qual ocorrerá a metanogênese. Neste compartimento, os valores de pH devem ser mantidos em magnitude mais elevada do que aqueles na câmara anterior, para que seja assegurado o desenvolvimento e atividades dos organismos metanogênicos. A temperatura desta câmara também deve ser específica, conforme as faixas de temperatura psicrófila, mesófila e termófila (Chernicharo, 2007). Adicionalmente, visando o armazenamento do biogás gerado, a segunda câmara geralmente está interligada a uma estrutura física com capacidade para tal finalidade.

No caso de processos de digestão com um número de estágios superior a 2 (dois), é utilizado o mesmo princípio de digestão em duplo estágio: em cada etapa são pré-estabelecidas condições bastante específicas, visando otimizar a sobrevivência de cada grupo de microrganismo envolvido. Apesar de se tratar de um processo mais específico, o mesmo se torna mais complexo, devido ao maior número de estágios, e portanto seus custos operacionais se tornam mais elevados.

Em relação à mistura (agitação) do substrato digerido, de maneira geral, esta é feita para garantir a transferência eficiente de material orgânico para a biomassa microbiana ativa, a liberação de gás no meio, e para se evitar a sedimentação de partículas mais densas do material. Conforme Bekkering *et al.* (2010), o efeito da mistura depende do tipo de substrato processado. Para diferentes substratos, a diferentes concentrações, a mistura pode ser benéfica ou indiferente. Já para a etapa de “start-up” do processo de digestão, a mistura pode não ser benéfica (Karim *et al.*, 2005). Além disso, o modo de mistura (contínuo ou intermitente, em intensidades variadas) influencia a produção de metano, dependendo do tipo de substrato (Kaparaju *et al.*, 2008).

Finalmente, em relação ao percentual de sólidos no substrato, pode ser realizada digestão a seco ou a úmido. Segundo Buekens (2005), o processo a seco apresenta um percentual típico de sólidos secos de 25 a 30%, enquanto o processo a úmido apresenta um percentual inferior a 15%. Estes percentuais se aproximam também dos valores mencionados por Busch (2008). O percentual de sólidos totais também pode influenciar no desempenho da biodigestão e formação de biogás, na medida em que um teor de sólidos mais reduzido propicia um melhor processo de mistura do substrato, facilitando a co-digestão de compostos diluídos. Os sistemas com teor de sólidos mais elevado, apesar de apresentarem digestores de tamanho mais reduzido e, portanto, com custos também menores, têm a necessidade de sistemas de bombeamento mais específicos, capazes de bombear um teor superior de sólidos, bem como requerem uma manutenção periódica mais freqüente, o que eleva o custo do processo.

Considerando-se os processos anaeróbios com substratos de elevada concentração de sólidos, segundo Gunaseelan (1997), os mesmos ocorrem onde a concentração de sólidos totais é superior a 25%, em um processo também chamado de fermentação anaeróbia seca. A maioria dos processos de digestão anaeróbia com alto teor de sólidos é direcionada, principalmente, aos resíduos sólidos urbanos.

O emprego de diferentes tipos de digestores, conforme os fatores operacionais e a natureza dos resíduos a serem tratados, também é descrita por Igoni *et al.* (2008). Segundo este autor, o percentual de sólidos no substrato determina o tipo de digestor selecionado. A possibilidade de mistura completa, ou a capacidade de fluir no aparato, podem determinar não somente o design de digestor mais apropriado, como apontar a necessidade de mistura com outros substratos líquidos (co-digestão). A necessidade de mistura com outros substratos líquidos, como esgoto ou mesmo a água, se apresenta, principalmente, em sistemas de digestão de fluxo contínuo. O emprego do fluxo contínuo é típico de substratos com reduzido teor de sólidos.

Ainda segundo Igoni *et al.* (2008), a mistura do substrato a ser digerido constitui-se em uma etapa importante no processo, na medida em que possibilita a manutenção de uma uniformidade da concentração de substrato, da temperatura e outros fatores ambientais, bem como evita a formação de espuma e deposição de sólidos. No caso de substratos com elevado teor de sólidos, a mistura mecânica torna-se mais difícil e pode ser inviabilizada economicamente. Observa-se, no entanto, que além da agitação mecânica, há a possibilidade de se fazer uma mistura via recirculação gasosa.

Para digestores anaeróbios, a especificação da taxa de circulação/carregamento do substrato afeta sensivelmente o projeto do digester anaeróbio, em especial parâmetros como volume e desempenho do processo. Segundo Igoni *et al.* (2008), a taxa de circulação/carregamento indica a quantidade de sólidos voláteis de ser introduzida no digester, por unidade de tempo. Os sólidos voláteis representam a parte sólida do material orgânico que pode ser digerida. A taxa de circulação depende dos tipos de resíduo alimentado no digester, uma vez que os mesmos determinam o nível de atividade bioquímica prevista.

3.4.3 – Processos anaeróbios utilizados para o processamento de biomassa e geração de energia

Através da observação desses fenômenos naturais, o ser humano conscientizou-se da possibilidade de produzir gás combustível de maneira mais controlada, a partir de biomassa.

Neste sentido, o uso da biomassa terrestre e aquática passa a ser considerado como de suma importância, visto que é considerada como uma fonte de energia renovável e potencialmente sustentável. Tradicionalmente utilizada através de combustão direta (Rao, 2010), o que acarreta na produção de poluentes atmosféricos, a biomassa pode também ser convertida em uma variedade de formas de energia como calor, vapor, eletricidade, hidrogênio, metano, etanol e metanol.

Dentre os processos mais indicados para a geração de energia através da biomassa, pode ser citada a digestão anaeróbia. Segundo Rao (2010), a digestão anaeróbia da biomassa requer um menor investimento de capital e custo por unidade de produção, em relação a outras energias renováveis, tais como hídrica, solar e eólica. Além disso, a energia renovável obtida a partir da biomassa está disponível nas áreas rurais, como um recurso doméstico, não estando sujeita a flutuações dos preços mundiais, ou às incertezas de abastecimento como de combustíveis importados e convencionais.

A digestão anaeróbia constitui-se em um processo utilizado no tratamento das águas residuais municipais desde o final do século 19. Este processo surgiu, inicialmente, como uma necessidade de controle da poluição em grandes fazendas. Com a evolução dos preços das fontes de energia convencionais e sua possível escassez, a produção de biogás para uso agrícola passou a ser uma possibilidade econômica, com a vantagem adicional de possibilitar o controle da poluição (Hobson & Feilden, 1982).

Conforme Gunaseelan (1997), resíduos sólidos urbanos diversos, incluindo cerca de 100 gêneros de frutas, legumes, folhas, ervas, madeiras, e mesmo biomassa marinha e de água doce, têm sido explorados por seu potencial de digestão anaeróbia, visando à formação de metano. Segundo Igoni *et al.* (2008), a geração de biogás, tem sido tradicionalmente a partir de matérias-primas como resíduos provenientes da exploração animal (estrumes, lamas e águas residuais), resíduos agro-industriais (provenientes de abatedouros, adegas, processamento de vegetais, plantas, etc), bem como esgoto sanitário em geral. Ressalta-se que a biomassa que porventura não apresenta características satisfatórias para a digestão, pode ser submetida a pré-tratamentos específicos, visando à melhoria de seu potencial para o processo.

Prática bastante conhecida e praticada tem se tornado a produção de biogás a partir da digestão anaeróbia em aterros sanitários. Esta necessidade vem aumentando em virtude da intensificação das atividades humanas nas últimas décadas, a qual tem gerado um acelerado aumento na produção de resíduos sólidos, tornando-se um grave problema para as populações em geral, e para as próprias administrações públicas. Segundo Figueiredo (2007), os aterros sanitários são considerados, atualmente, uma das alternativas mais interessantes para geração do biogás. Eles dispõem de técnicas de captação dos gases liberados, através de dutos de captação, e queima posterior em flares, onde o metano, principal constituinte do biogás, é convertido em gás carbônico, que possui um potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor que o metano. Nestes aterros, pode ocorrer também o aproveitamento do chorume, líquido proveniente da decomposição de resíduos orgânicos, o qual muitas vezes, passa por processo de digestão anaeróbia, para produção de biogás. Existem ainda projetos combinados, envolvendo a digestão de percolado e esgoto sanitário, com a finalidade de produção de biogás, conforme mostra Leite *et al.* (2003).

Segundo Holm-Nielsen *et al.* (2009), outra prática comum e crescente, principalmente na Europa e outros países desenvolvidos, a digestão anaeróbia de estrume animal em fazendas e unidades de produção animal. Este processo oferece vários benefícios, tanto ambiental como econômico. Além de um tratamento ambiental do resíduo gerado, incluindo a redução de odores e agentes patogênicos, há a produção de um combustível renovável, o biogás. O esterco tratado ainda é utilizado como um fertilizante mais adequado ao solo, nas próprias áreas rurais.

Segundo Holm-Nielsen *et al.* (2009), políticas existentes na União Européia apontam para a adoção de metas fixas de abastecimento energético, para o ano de 2020, onde 20% da demanda deve ser atribuída a fontes de energia renovável. Neste contexto, estima-se que pelo

menos 25% do total de bioenergia no futuro podem se originar a partir do biogás, produzido a partir de materiais orgânicos como: esterco animal, resíduos provenientes da agricultura, dentre outros.

Além dos processos de digestão anaeróbia realizados para os diferentes tipos de biomassa, em separado, vem sendo praticado o processo denominado co-digestão (Mata-Alvarez, 2000). A co-digestão constitui-se em uma opção para melhorar o rendimento de digestão de determinados materiais, em processos anaeróbios. Neste processo, ocorre a utilização de um co-substrato, juntamente ao substrato principal, o qual, geralmente, melhora o rendimento da digestão devido à sinergia positiva estabelecida no meio, bem como ao fornecimento de nutrientes em falta no primeiro substrato. Além disso, o co-substrato pode proporcionar ao conjunto o teor de umidade ideal. Há também vantagens econômicas, como o compartilhamento dos mesmos equipamentos de digestão. Segundo reportado por Mata-Alvarez (2000), há vários exemplos de estudos de co-digestão, tais como aqueles envolvendo os seguintes materiais: resíduos sólidos urbanos (fração orgânica) e lodo de esgoto; estrume e resíduos orgânicos industriais; estrume de frangos e bovinos; resíduos sólidos urbanos (fração orgânica) e estrume; dejetos suínos, lodo de esgoto e efluentes da produção de azeite; dentre outros.

3.4.3.1 – Pré-tratamento de biomassa visando melhorias no processo de digestão

Segundo Hendriks & Zeeman (2009), a biomassa lignocelulósica é uma fonte potencial para produção de biogás e a produção de etanol. No entanto, alguns fatores, como o teor de lignina, cristalinidade da celulose, e tamanho das partículas do substrato, podem limitar a sua digestibilidade. Neste sentido, alguns tipos de pré-tratamento têm sido utilizados com o objetivo melhorar esta digestibilidade, através da ação sobre a celulose, hemiceluloses e lignina, os três principais componentes da biomassa lignocelulósica.

Dentre os pré-tratamentos empregados, podem ser citados os pré-tratamentos térmico; ácido; alcalino; oxidativo; e combinações, como adição de amônia e dióxido de carbono.

Conforme Hendriks & Zeeman (2009), no pré-tratamento térmico, a biomassa lignocelulósica é aquecida a uma temperatura específica. O aumento da temperatura a uma faixa superior a 150-180 °C (aliada à pressurização) acarreta em uma solubilização das hemiceluloses, e posteriormente da lignina. Durante este processo de aquecimento, parte das hemiceluloses é convertida em ácidos que, por sua vez, catalisam o próprio processo de hidrólise deste

componente. Por outro lado, os compostos produzidos a partir da solubilização da lignina se constituem, em grande parte, por compostos fenólicos, que em muitos casos produzem um efeito inibidor ou tóxico sobre os microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia. Estes compostos solúveis de lignina são, no entanto, bastante reativos e, caso não sejam removidos rapidamente, podem se condensar novamente, precipitando-se sobre a biomassa. O emprego de temperatura a partir de 250 °C pode promover a pirólise do substrato.

Em relação ao pré-tratamento ácido, conforme Hendriks & Zeeman (2009), este consiste na adição de ácidos diluídos ou mais concentrados, e visam à solubilização das hemiceluloses, tornando a celulose mais acessível à digestão. A principal reação ocorrida constitui-se na hidrólise das hemiceluloses. As hemiceluloses solúveis podem ser submetidas a reações hidrolíticas, com a consequente produção de monômeros, furfural, e outros (voláteis). A lignina solubilizada também é rapidamente condensada e precipitada. A solubilização das hemiceluloses e precipitação de lignina são mais pronunciadas durante o pré-tratamento com ácido forte, em comparação ao ácido diluído. Compostos solúveis de lignina podem ter efeito inibidor no processo.

Durante o pré-tratamento alcalino as primeiras reações que ocorrem são solvatação e saponificação, as quais provocam um estado de “inchaço” da biomassa, tornando-a mais acessível às enzimas e microrganismos (Hendriks & Zeeman (2009)). Em dissoluções em compostos alcalinos fortes, ocorrem a hidrólise alcalina, e a degradação e decomposição de polissacarídeos dissolvidos. A extração de álcalis também pode causar a solubilização, a redistribuição e condensação de lignina, bem como modificações na estrutura cristalina da celulose. Estes efeitos podem diminuir ou neutralizar os efeitos positivos da remoção de lignina e a acessibilidade da celulose a enzimas e microrganismos. Outro aspecto importante do pré-tratamento alcalino é a alteração da estrutura de celulose para uma forma que é mais densa e termodinamicamente mais estável do que a celulose nativa.

Nos processos de pré-tratamento oxidativo, ocorre a adição de um composto oxidante à biomassa, como o peróxido de hidrogênio ou o ácido peracético. O objetivo é remover as hemiceluloses e lignina para aumentar a acessibilidade da celulose. Durante este processo, conforme Hendriks & Zeeman (2009), podem ocorrer reações diversas, como a substituição eletrofílica, o deslocamento das cadeias laterais, clivagem de ligações éter alquil arila, ou a clivagem oxidativa de núcleos aromáticos. Em muitos casos, o oxidante utilizado não é seletivo, podendo ocorrer, portanto, perdas de hemiceluloses e celulose. Há ainda um risco

elevado de formação de substâncias inibidoras da digestibilidade do substrato, em virtude da oxidação da lignina e a conseqüente formação de compostos aromáticos solúveis.

Considerando-se ainda o pré-tratamento oxidativo, Teixeira *et al.* (1999) investigou o uso do ácido peracético à temperatura ambiente, como um método de pré-tratamento para o bagaço de cana-de-açúcar. O ácido peracético se apresentou bastante seletivo para a lignina, não sendo ainda observadas perdas significativas de carboidratos. A hidrólise enzimática da celulose aumentou de 6,8% (sem tratamento) para um percentual máximo de cerca de 98%, com um pré-tratamento de ácido peracético 21%. Teixeira *et al.* (1999) apresentaram resultados semelhantes para a digestibilidade, usando uma mistura de NaOH e ácido peracético.

Em relação aos processos combinados, estes consistem do emprego combinado dos pré-tratamentos térmico e ácido; térmico e alcalino; térmico e oxidativo; térmico e oxidativo-alcalino; e outros, como a combinação de amônia e dióxido de carbono.

Conforme Hendriks & Zeeman (2009), considerando-se os pré-tratamentos disponíveis, aqueles realizados com ácidos concentrados, oxidação úmida, solventes e complexos metálicos são eficazes, mas também com custos mais elevados, podendo inviabilizar o processo. O tratamento prévio utilizando vapor, cal, sistemas a base de amônia, dentre outros, possuem um melhor custo-benefício. O efeito dos pré-tratamentos dependem sensivelmente da composição da biomassa e das condições operacionais propostas. Todos esses pré-tratamentos possuem suas vantagens e desvantagens, sendo ainda necessárias pesquisas adicionais visando sua otimização.

Um outro aspecto importante constitui-se na escolha do biocombustível a ser produzido. Apesar de não existirem grandes diferenças entre a produção de etanol e conversão a metano, uma desvantagem da produção de etanol, é a baixa tolerância para substâncias inibidoras, como compostos fenólicos, pelas leveduras. A maior tolerância para compostos inibidores, a possibilidade de geração de combustível em uma simples etapa do processo, bem como a utilização de uma célula a combustível direta de metano, pode favorecer a produção de CH₄ no lugar de etanol (Murray *et al.*, 1999).

3.4.4 – O biogás

O biogás, descoberto por Shirley, em 1667, é um dos produtos da decomposição anaeróbia (ausência de oxigênio gasoso) da matéria orgânica, que se dá através da ação de determinadas espécies de bactérias.

O biogás é composto principalmente por metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), sendo que sua composição exata dependerá do material orgânico submetido à digestão e do tipo de tratamento anaeróbio ocorrido.

Naskeo Environment (2009) apud EPA (2011) estabelece diferentes composições para o biogás, dependendo do substrato orgânico de origem, conforme apresentado na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Percentual de gases no biogás em função do substrato orgânico de origem

Componente	Resíduos domésticos	Lodo de plantas de tratamento de águas residuárias	Resíduos agrícolas	Resíduos de indústrias agro-alimentícias
CH ₄ (% vol)	50 - 60	60 - 75	60 - 75	68
CO ₂ (% vol)	34 - 38	1 - 33	19 - 33	26
N ₂ (% vol)	0 - 5	0 - 1	0 - 1	-
O ₂ (% vol)	0 - 1	< 0.5	< 0.5	-
H ₂ O (% vol)	6 (a 40 °C)	6 (a 40 °C)	6 (a 40 °C)	6 (a 40 °C)

Ainda segundo Naskeo Environment (2009) apud EPA (2011), assim como em outras referências, como CETESB (2009), o biogás pode ainda apresentar algum teor de gás sulfídrico (H₂S) e/ou amônia (NH₃), porém mais reduzido.

Embora o percentual de constituintes seja em geral semelhante, alguns autores sugerem que o biogás pode ser considerado com uma faixa de composição mais abrangente de metano (40 a 75%, segundo Salomon & Lora (2009)).

Segundo Igoni *et al.* (2008), o biogás se constitui ainda em um gás incolor, relativamente inodoro (na ausência de H₂S), inflamável, estável e não tóxico.

Considerando-se o potencial de geração de energia a partir do biogás, este depende da sua composição. Segundo Salomon & Lora (2009), o poder calorífico inferior do biogás pode oscilar, geralmente, entre 5.300 e 6.000 kcal/m³, devido à variação do teor de metano, considerando-se ainda o poder calorífico do metano puro como cerca de 8560 kcal/m³. Quanto mais purificado for o biogás (maior concentração de metano), maior o seu poder calorífico.

Apenas a título comparativo, a tabela 3.10 mostra diferentes valores de poder calorífico inferior – PCI para combustíveis gasosos distintos.

Tabela 3.10 – Poder calorífico inferior de diferentes combustíveis

Combustível gasoso	Poder Calorífico Inferior – PCI
Metano	8507 kcal/Nm ³
Gás Natural	7612 kcal/Nm ³
Propano	22036 kcal/Nm ³
Butano	28045 kcal/Nm ³
Biogás ⁽¹⁾	5300 – 6000 kcal/m ^{3*}

(1) Estimativa mencionada anteriormente no texto

FONTE: Salomon & Lora (2009)

O biogás pode ser utilizado como combustível em substituição ao gás natural e/ou gás liquefeito de petróleo (GLP), bem como fonte de geração de energia elétrica através de geradores elétricos acoplados a motores de explosão adaptados ao consumo de gás.

Segundo Holm-Nielsen *et al.* (2009), o biogás possui vantagens concretas como combustível, mesmo se comparado a outras alternativas renováveis de energia. Pode ser produzido quando necessário e pode ser facilmente armazenado. Se purificado, pode ser distribuído através da infra-estrutura de gás natural e utilizado nas mesmas aplicações que este outro combustível. Além da utilização de energia renovável e produção de calor, o biogás pode substituir os combustíveis fósseis no setor de transporte.

A utilização do biogás “in natura” como combustível pode ainda ser feita de maneiras distintas: na sua forma, tal qual é produzido, ou em uma forma purificada, até uma qualidade de gás natural (Bekkering *et al.*, 2010; Holm-Nielsen *et al.*, 2009).

Conforme Bekkering *et al.* (2010), a purificação do biogás é realizada, geralmente, através dos seguintes processos: secagem inicial do gás; dessulfurização (remoção de H₂S); enriquecimento de metano (remoção de CO₂); e remoção de outros compostos, caso necessário. Atualmente, as técnicas mais utilizadas para a purificação do biogás são conhecidas como “water scrubbing” (técnica baseada na absorção física de gases dissolvidos em líquidos); adsorção por pressão (PSA); e separação por membrana ou criogênica.

Considerando-se ainda o biogás purificado, Bekkering *et al.* (2010) aponta que, em muitos casos, não é necessária uma purificação completa do biogás, a gás natural, para uma utilização eficiente. A possibilidade de mistura destes combustíveis deve ser melhor investigada, considerando-se tanto aspectos técnicos como econômicos.

3.5. Biodigestão de Materiais Biogênicos em Duplo estágio – Tecnologia para otimização da biodigestão aplicada à produção de biogás – Processo Busch & Sieber

3.5.1 – Histórico dos processos a seco e a úmido, em duplo estágio

Conforme Busch & Sieber (2006), o princípio da fermentação a seco e a úmido, operado em duas etapas, foi descrito, inicialmente, por Gosh, em 1978. Neste processo, resíduos orgânicos específicos foram percolados em um reator anaeróbio, sendo a água de percolação posteriormente fermentada em um reator anaeróbio, para formação de metano. Este processo foi posteriormente desenvolvido e patenteado por Rijkens & Hofank, na década de 1980 (patente norte-americana de número 4.400.195).

Durante a década de 80, segundo Busch & Sieber (2006), Wellinger e Suter realizaram testes com esta tipologia de processo, desta vez utilizando resíduos de esgoto sólido; e Widmer, utilizando resíduos comerciais e de abatedouros.

Posteriormente, segundo Busch & Sieber (2006), novas tecnologias foram sendo implementadas, como o processo de percolação denominado ISKAR e o processo BIOPERCOLATR (Patente Alemã 198 46 336 A1, de 1999). Nestes casos, o substrato, após um pré-tratamento mecânico, é hidrolisado em um percolador. Este percolador é equipado com um agitador, de modo que todo o substrato seja continuamente transportado pelo reator. Após um tempo de residência de aproximadamente 2 a 3 dias, o percolado é desidratado, e encaminhado para tratamento ou sedimentação. A água de percolação é fermentada em um reator anaeróbio, para produção de biogás. A água purificada pode então retornar a um novo processo, como água de percolação.

3.5.2 – Descrição geral do processo Busch & Sieber

A tecnologia descrita por Busch & Sieber (2006), constitui-se em um método de decomposição de material biogênico para obtenção de biogás, a partir de um aparato de biodigestão específico, em duplo estágio, onde é empregado um processo a seco e a úmido. Esta tecnologia foi patenteada inicialmente em 2006, sob o número WO 2006/048008 A2.

O termo “material biogênico” pode ser definido como a biomassa em geral: substâncias provenientes de seres vivos, tais como biorresíduos, cortes vegetais, restos de tecidos, alimentos, resíduos de aglomerados humanos, agrícolas, bovinos, matérias-primas renováveis

e materiais similares. O material biogênico possui uma constituição essencialmente orgânica, aplicável ao processo de biodigestão.

De acordo com a patente estudada, foi concebido um aparato de biodigestão específico, em duplo estágio, visando à digestão de material biogênico no estado físico sólido, e onde uma concepção física vantajosa possibilita uma otimização do processo de digestão, com um controle da produção de biogás, de acordo com a demanda requerida.

A demanda de biogás, destinada à produção de energia na forma de eletricidade ou obtenção de calor, pode ser regulada de maneira correspondente, alternando entre instantes de pico e instantes de carga mais fraca. Neste sentido, o processo de decomposição proposto pela patente possibilita uma adaptação mais instantânea a novas demandas requeridas.

O biogás apresenta como composição média, de maneira geral, uma mistura de metano - CH₄ (50 a 85% em volume), dióxido de carbono (15 a 50% em volume), e outros gases, como oxigênio, nitrogênio, dentre outros. Considerando-se o processo de biodigestão proposto pela patente estudada, no entanto, foi demonstrada uma obtenção de biogás contendo uma fração mais elevada de metano, entre 65 e 80% em volume. A fração mais elevada de metano confere ao biogás produzido melhores características energéticas.

Em termos de estruturas físicas de processo do aparato proposto, estão presentes as seguintes unidades principais:

- Estágio 1 (etapas metabólicas de hidrólise / acidogênese): um tanque de hidrólise (quantidade mínima), um tanque pulmão (recipiente tampão);
- Estágio 2 (etapas metabólicas de acetogênese / metanogênese): um reator anaeróbio (quantidade mínima), e um tanque de estocagem (recipiente tampão de armazenamento).

A seguir é apresentada a figura 3.5, contendo um desenho esquemático do aparato de biodigestão.

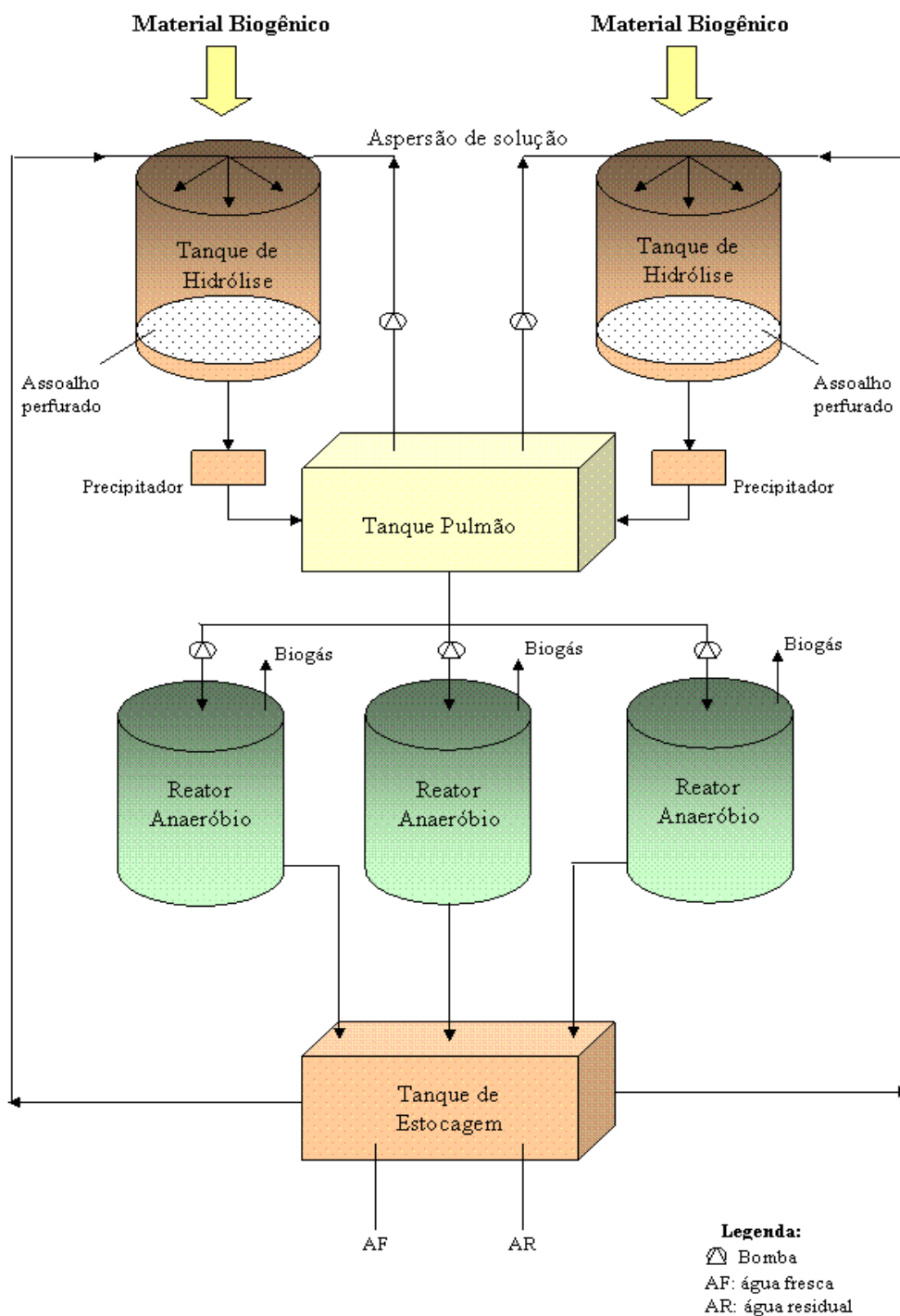


Figura 3.5 – Desenho esquemático do aparato de biodigestão de Busch & Sieber (2006)
 FONTE: Busch & Sieber (2006)

No processo de Busch & Sieber (2006), o substrato biogênico “fresco”, a ser processado, é disposto em recipientes específicos, denominados tanques de hidrólise ou percoladores. Durante todo o processo de digestão no aparato, a biomassa sólida ficará disposta nestes tanques de hidrólise, sendo trocada por novo substrato (fresco) apenas quando a biodigestão for finalizada. Os tanques de hidrólise são mantidos em pressão ambiente.

Observa-se que, de preferência, devem ser consideradas no aparato, duas unidades de tanque de hidrólise, operando em paralelo, com sistema de bombeamento específico para cada tanque. Estes tanques, no entanto, podem ser interconectados. Além de uma maior liberdade em termos de processo, a existência de um número maior de tanques de hidrólise possibilita a vantagem de uma carga e descarga de biomassa mais frequentes, sem interrupção do processo.

Observa-se ainda que a parte inferior dos tanques de hidrólise é constituída por um assoalho perfurado, que permite a passagem e circulação contínua de solução líquida, sem que o substrato sólido seja carreado (separação sólido / líquido). Uma possibilidade para se evitar entupimentos no assoalho, pode ser aplicada, de maneira descontínua, um sopro de pressão por estas paredes perfuradas.

A biomassa disposta nos tanques de hidrólise é submetida à percolação contínua e cíclica de um líquido, inicialmente água pura. À medida em que é submetida à percolação através do substrato a ser digerido, a água circulante vai solubilizando os compostos formados pela degradação biológica natural da biomassa, tornando-se enriquecida de, principalmente, ácidos orgânicos.

A cada ciclo de percolação através do substrato, o líquido percolado, cada vez mais enriquecido, é separado do material sólido através do assoalho perfurado, de onde é recolhido no tanque pulmão, e posteriormente aspergido novamente sobre o material disposto no tanque de hidrólise. Observa-se que o aparato é dimensionado para que haja uma quantidade “em excesso” do líquido de percolação, que permite que o tanque pulmão esteja sempre com certa quantidade de líquido, disponível para a percolação.

Existe a possibilidade de emprego de decantadores, interligados aos tanques de hidrólise. Nestes decantadores podem ser recolhidos materiais sólidos que porventura atravessem os tanques. Além destes, os próprios tanques de estocagem podem servir para esta finalidade.

Paralelamente a esta primeira etapa da digestão, a solução de percolação, enriquecida com compostos solubilizados da biodigestão da biomassa, disposta no tanque pulmão, vai sendo bombeada, a uma vazão específica, para um reator estritamente anaeróbio, usualmente o reator UASB – reator anaeróbio de fluxo ascendente. Neste reator, ocorre a ação dos microrganismos metanogênicos, para produção do biogás.

No reator anaeróbio, o biogás produzido é direcionado para a parte externa do reator, onde poderá ser utilizado como biocombustível e convertido em energia.

Paralelamente à produção de biogás, a fase líquida purificada no reator, considerada como água residual de processo, é direcionada para armazenamento no tanque de estocagem. Este direcionamento se dá na medida em que uma nova quantidade de solução proveniente do tanque pulmão é bombeada para o reator. Deste novo tanque de armazenamento, a água residual, é bombeada para o tanque pulmão, de onde pode ser novamente aspergida na biomassa, fechando-se desta forma, um processo cíclico de biodigestão.

A operação do aparato de biodigestão, para uma batelada de material biogênico “fresco”, continua ocorrendo até que seja verificada uma queda da vazão de biogás produzida e/ou do percentual de metano no biogás gerado. A combinação destes dois fatores determinará o momento em que o processamento deste material deixa de ser viável técnica e economicamente. Neste momento, o material biogênico já processado, e até então disposto nos tanques de hidrólise, é retirado e trocado por uma nova batelada de material “fresco”. O processo é então, reiniciado.

O resíduo final de processo, constituído pelo material biogênico processado, usualmente pode ser reaproveitado como adubo para fins agrícolas, devido à sua constituição química.

Em relação à água residual de processo, a fim de se evitar uma acumulação dos mais diferentes materiais, ocorre, a cada novo ciclo, a retirada de uma parte desta água de circulação, havendo, então, uma reposição com água nova, no tanque pulmão. Observa-se que, durante o processo de biodigestão no aparato descrito, podem ocorrer perdas de água por incorporação ao substrato processado, perdas por evaporação e, em menor proporção, coletas de amostras.

Segundo dados experimentais (comunicação pessoal com a BTU), a produção de metano pode chegar a um valor de $0,1 - 0,4 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg}$ matéria orgânica seca.

A intercalação das etapas de hidrólise/acidogênese, e acetogênese/metanação, permite um aumento da eficiência do processo. Como não há adição de produtos químicos para controle do pH, o equilíbrio entre a produção de ácidos orgânicos no primeiro estágio (e a conseqüente diminuição do pH); e o controle das taxas de circulação de solução no aparato (vazões de percolação *versus* vazão de entrada no reator anaeróbio), permite a manutenção das condições ideais de sobrevivência de cada microrganismo envolvido no processo, otimizando-se, desta forma, a produção de biogás.

3.5.2.1 - Condições operacionais

As estruturas físicas de cada estágio do processo mencionado são mantidas sob condições operacionais específicas, com controle de parâmetros físico-químicos pertinentes, visando o favorecimento das taxas de crescimento dos referidos microrganismos e, conseqüentemente, uma otimização dos respectivos processos metabólicos.

- **Condição aeróbia e anaeróbia das estruturas**

Os tanques de hidrólise são mantidos fechados em virtude da circulação da solução de percolação. No entanto, não há necessidade de que estes tanques sejam anaeróbios, sendo permitida entrada de ar nestas estruturas. Esta entrada de ar pode ocorrer devido aos “sopros de pressão” no assoalho perfurado, ou através de algum acesso natural de ar.

Em termos de segurança operacional, a própria estrutura aeróbia destes recipientes não torna possível a formação de metano nesta etapa, e desta forma, uma atmosfera com perigo de explosão nos tanques.

Durante o segundo estágio do processo, o reator de conversão de metano deve ser estritamente anaeróbio, visando o desenvolvimento das *arqueas* metanogênicas.

- **Temperatura**

Em termos de temperatura de processo, o primeiro estágio (tanque de hidrólise) deve ser mantido a uma temperatura aproximada de 30 °C.

Já o reator anaeróbio, este pode ser mantido a uma temperatura típica de um processo mesofílico (cerca de 37 °C), ou termofílico (cerca de 55 °C). Considerando-se os custos operacionais para manutenção do processo, e o fato de que dados experimentais têm demonstrado uma eficiência similar para ambas as temperaturas (Busch, 2008), usualmente, a temperatura mesofílica tem sido mais utilizada para este aparato.

- **pH**

Os valores de pH referentes a cada estágio do processo, podem ser medidos a partir de amostras de solução coletadas no tanque pulmão e tanque de estocagem, os quais são correspondentes ao 1º e 2º estágios do processo, respectivamente.

Os valores de pH esperados para o 1º estágio (solução do tanque pulmão), devem oscilar entre 3,8 e 6,5. Estes valores mais reduzidos demonstram a eficiência da degradação inicial da matéria orgânica, através da formação dos ácidos orgânicos.

Já para o 2º estágio do processo (solução do tanque de estocagem), o pH deve estar situado, preferencialmente, entre 7,0 e 8,5. O controle do pH após a metanogênese constitui-se em um indicador da eficiência do reator anaeróbio.

Os valores de pH devem ser mantidos nas faixas esperadas, visando uma otimização da sobrevivência dos grupos de microrganismos envolvidos e, conseqüentemente, uma otimização da produção de biogás.

Visando o controle destes valores, não é empregada a adição de produtos químicos em qualquer etapa do processo. Desta forma, o pH “naturalmente” alcançado é mantido a partir do controle dos seguintes parâmetros de processo:

- Quantidade total de solução de percolação;
- Taxa de percolação de solução nos tanques de hidrólise;
- Taxa de circulação de solução no reator anaeróbio.

A quantidade total de solução de percolação influencia o valor do pH na medida em que quanto maior a quantidade de solução em percolação, em conjunto com a solução estocada no tanque pulmão, mais diluída em ácidos orgânicos será a solução “enriquecida”, e portanto, mais elevado será o seu pH.

A taxa de percolação de solução nos tanques de hidrólise pode influenciar na concentração e enriquecimento desta solução. De maneira geral, assume-se que, quanto maior a taxa de circulação da solução, mais elevado será o seu enriquecimento. Este aumento da taxa, no

entanto, apresenta um “valor limite”, a partir do qual não é verificado um aumento significativo e/ou apropriado para sua concentração.

A taxa de circulação da solução proveniente do tanque pulmão, no reator anaeróbio, afetará, particularmente, o pH do 2º estágio do processo. Considerando-se o pH mais reduzido do 1º estágio, deve haver um equilíbrio entre os microrganismos existentes para a biodigestão, e a quantidade de substrato a ser digerido. Uma vazão mais elevada de entrada no reator, pode acarretar em um “excesso” de ácidos orgânicos nesta etapa, comprometendo a sobrevivência das arqueas metanogênicas, e fazendo com que o pH seja reduzido.

- **Nutrientes**

Em princípio, no aparato de biodigestão proposto, não há a necessidade de adição “extra” de nutrientes. Estes compostos entram no processo como parte da própria constituição da biomassa digerida (os substratos orgânicos usualmente já apresentam um teor suficiente de elementos e compostos considerados nutrientes).

Geralmente, apenas visando uma maior otimização do processo, são adicionados nutrientes, em concentrações específicas. Estes nutrientes são adicionados na solução em circulação no aparato.

- **Ausência de adição de substâncias químicas**

À exceção da adição eventual de nutrientes à solução circulante no processo, não é empregada a adição de quaisquer produtos químicos ao processo.

Uma vez que há circulação de solução, em circuito fechado no processo, até o final da biodigestão de cada batelada de biomassa fresca disposta, a ausência da adição de compostos químicos favorece a ausência de acúmulo de substâncias que possam inibir o processo de digestão.

- **Taxas de circulação de solução: percolação nos tanques de hidrólise e circulação no reator anaeróbio**

Segundo Busch & Sieber (2006), as taxas de circulação, tanto nos tanques de hidrólise (percolação), como no reator anaeróbio, foram definidas experimentalmente, sendo em geral particulares para cada tipo de biomassa processada. A definição destas taxas foi feita em virtude da “matéria orgânica seca” contida em cada substrato.

A “matéria orgânica seca” - MOS (ou sólidos voláteis), segundo Busch (2008), foi definida como a massa total do substrato, subtraindo-se os teores de umidade e de cinzas.

Para o 1º estágio do processo (taxa de percolação no tanque de hidrólise), Busch (2008) a aplicação de uma taxa geral de 100 litros de solução por kg de MOS por dia. Esta taxa é, em geral, aplicada para todos os tipos de materiais processados.

Para o 2º estágio do processo (circulação no reator anaeróbio), tendo-se como base um reator com volume útil de 120 litros, Busch (2008) sugere a aplicação de uma taxa “inicial” de cerca de 7 litros de solução por kg de MOS por dia. Esta taxa não é considerada universal, mas sim um ponto de partida para a taxa ideal.

Observa-se que estas taxas de circulação podem ocorrer de maneira contínua ou descontínua, contanto que o volume total diário de solução seja circulado no aparato. Desta forma, pode-se optar por um sistema de bombeamento que garanta uma circulação contínua (bombeamento contínuo, 24 horas/dia), totalizando, no final de cada dia, as taxas mencionadas acima (100 litros de solução por kg de MOS por dia; e 7 litros de solução por kg de MOS por dia, para o 1º e 2º estágios, respectivamente). Da mesma maneira, pode-se optar por um sistema de bombeamento que garanta as mesmas taxas totais requeridas (no 1º e 2º estágios), porém com bombeamento descontínuo, ou seja, o bombeamento ocorre periodicamente, durante um intervalo de tempo padrão, pré-definido (por exemplo, durante cada dia podem ocorrer 12 ciclos de bombeamento, cada um com duração de 10 minutos. Deste modo, a cada 2 horas o sistemas de bombeamento seria acionado e funcionaria, em cada acionamento, durante 10 minutos. O volume total circulado no dia corresponderia ao estipulado).

3.5.3 – Biodegradabilidade durante a operação do processo Busch & Sieber (2006)

Em relação à biodegradabilidade esperada para os diferentes tipos de biomassa, Busch (2008) determina algumas faixas específicas de decomposibilidade para diferentes substratos. A figura 3.6 apresenta um desenho ilustrativo desta propriedade.

Biodegradabilidade	Substrato (exemplos)
Nenhuma	Lignina Proteína (creatina)
Ruim	Celulose
Moderada	Gordura Hemiceluloses
Boa	Óleo
Muito boa	Açúcar Proteína (mucina) Amido

FIGURA 3.6 – Biodegradabilidade de alguns substratos orgânicos
 FONTE: Adaptado de Busch (2008).

Como pode ser visualizado na figura 3.6, os substratos contendo açúcar, amido e proteína (mucina) constituem-se naqueles com melhor biodegradabilidade. A gordura, óleo e hemiceluloses, possuem uma biodegradabilidade variando entre boa e moderada; a celulose entre moderada e ruim; e a lignina e proteína (creatina) não apresentam indícios de degradabilidade no aparato descrito.

3.5.4 – Controle da produção de biogás pelo processo Busch & Sieber (2006)

O processo Busch & Sieber (2006) possibilita um controle da produção de biogás, de acordo com a demanda requerida. Esta demanda de biogás, por exemplo, visando à produção de eletricidade ou obtenção de energia térmica (calor), pode ser regulada de maneira correspondente aos instantes de pico ou em instantes de carga mais fraca. Deve ser ressaltado que o processo Busch & Sieber possibilita uma rápida adaptação à demanda real de biogás.

O controle da produção de biogás conforme a demanda é feito através da utilização dos recipientes tampão de armazenamento (tanque pulmão e tanque de estocagem), os quais podem ser dimensionados de maneira correspondente à quantidade de líquido de percolação necessária para circulação.

O dimensionamento destes tanques e o controle da circulação do líquido de percolação podem, desta forma, garantir o controle da quantidade de material a ser processado e, portanto, da produção de biogás. No aparato proposto, a função dos armazenadores de gás existentes em biodigestores convencionais, é substituída pelo armazenamento do líquido de percolação, através dos recipientes de armazenamento.

Além disso, a própria flexibilidade do número de tanques de hidrólise e reatores anaeróbios, permite que cada parte do processo seja mantida em operação, ou desativada. Este fato também permite um controle da produção de biogás no processo.

Em termos de segurança operacional, uma vez que o processo comporta o armazenamento de líquido, e não de biogás, além do fato de os tanques de hidrólise operarem em regime aeróbio (ausência da produção de biogás), o aparato proposto garante uma redução significativa da probabilidade de riscos de explosão.

3.5.5 – Particularidades e limitações do processo Busch & Sieber (2006)

Como particularidades e limitações principais do processo Busch & Sieber (2006), podem ser mencionadas:

- O desconhecimento, até o presente momento, da quantidade ideal de “percolado em excesso”, armazenado no tanque pulmão;
- As taxas de circulação ideais de percolado e água residual são específicas para cada tipo de substrato processado.

Em relação à quantidade ideal de “percolado em excesso” armazenado no tanque pulmão, uma maior ou menor quantidade pode acarretar em uma maior ou menor concentração de compostos orgânicos solúveis a serem bombeados ao reator anaeróbio. Esta concentração deve, no entanto, estar em equilíbrio com a taxa de bombeamento desta solução ao reator anaeróbio. Uma elevada concentração aliada a uma elevada taxa de bombeamento pode afetar o equilíbrio do meio biológico no reator. Por outro lado, uma concentração mais reduzida de compostos orgânicos (no caso de um maior volume de solução no tanque pulmão), aliada a uma taxa de bombeamento aquém da ideal, para o reator, pode acarretar em uma diminuição da produção de biogás, o que corresponde a uma não otimização do processo como um todo.

O volume de solução no tanque pulmão, bem como as taxas de circulação no processo, são específicos para cada tipologia de substrato processado no processo Busch & Sieber (2006).

Aliada a estas particularidades e limitações descritas, pode ainda ser mencionada uma eventual geração de efluentes e/ou resíduos do processo de biodigestão de Busch & Sieber (2006). Esta geração dependerá, exclusivamente, da tipologia do substrato processado.

No caso do bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, não é gerado, em princípio, qualquer efluente líquido no processo, uma vez que ao final de cada ciclo, uma grande parte da solução circulante na planta é absorvida pelo próprio bagaço, havendo necessidade de “complementação” de água nova no processo, a cada início de ciclo, e não o seu descarte. Já o bagaço final gerado em cada ciclo, este deve ser destinado à queima em caldeiras para co-geração de energia elétrica, não sendo considerado, desta forma, como um resíduo propriamente dito.

Para outros substratos como, por exemplo, restos de frutas e vegetais, praticamente todo o material acondicionado nos tanques de hidrólise, para biodigestão, são de fato digeridos, não restando material sólido ao final do processo. Por outro lado, sua elevada biodegradabilidade no processo de digestão anaeróbia, bem como seu elevado teor de umidade, podem ocasionar um maior acúmulo de solução circulante no processo. Desta forma, dependendo da duração dos ciclos operacionais, bem como da quantidade de material a ser digerido, pode ser necessário, eventualmente, algum descarte da solução circulante.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa realizada envolve o estudo e a avaliação do aproveitamento energético do bagaço de cana-de-açúcar, a partir da comparação entre 2 (duas) rotas potenciais de geração de energia, a saber:

- Rota 1: rota tradicional de geração de energia - queima do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica (co-geração);
- Rota 2: rota alternativa de geração de energia - produção de metano (biogás) através de tecnologia de biodigestão anaeróbia específica, e posterior queima do bagaço de cana-de-açúcar, para geração de energia elétrica.

A comparação entre as rotas é dada pelo somatório do potencial de geração de energia de cada rota, em termos de Poder Calorífico Inferior – PCI do bagaço e biogás gerados. Não foram contabilizados os gastos energéticos dos processos de geração de biogás e energia elétrica.

A produção de metano (biogás) na rota alternativa foi feita conforme a tecnologia patenteada e descrita por Busch e Sieber (2006).

A seguir é apresentada a metodologia aplicada neste trabalho de pesquisa, a qual está relacionada às seguintes atividades do projeto:

- Visita inicial de reconhecimento em Usina de produção de álcool
- Origem e coleta do bagaço de cana-de-açúcar processado na Planta Piloto;
- Caracterização físico-química do bagaço de cana-de-açúcar;
- Construção e Montagem da Planta Piloto;
- Operação da Planta Piloto para o processamento de bagaço de cana-de-açúcar – aspectos operacionais e análises laboratoriais de rotina;
- Obtenção de correlações típicas de parâmetros físico-químicos para o processamento do bagaço de cana-de-açúcar;
- Cálculo dos potenciais de geração de energia das 02 (duas) rotas de processo consideradas.

Os subitens seguintes apresentam um detalhamento de cada aspecto relacionado anteriormente.

4.1 – Visita inicial de reconhecimento em Usina de produção de álcool

A primeira etapa deste trabalho de pesquisa foi constituída por uma visita técnica à Usina de produção de álcool Alpha Destilaria Ltda., localizada no município de Cláudio – MG, local onde foi feita toda a coleta do bagaço de cana-de-açúcar objeto de estudo.

Esta visita técnica foi realizada com a finalidade de reconhecimento da rotina operacional do processamento da cana-de-açúcar, desde a etapa de colheita até a produção final de combustível, bem como o entendimento dos principais aspectos produtivos e ambientais do processo. Foi ainda levantada uma listagem dos principais subprodutos obtidos em usinas sucroalcooleiras, suas propriedades e utilização final.

Após o reconhecimento do processo produtivo e rotinas operacionais, foi possível estabelecer um planejamento de coleta e caracterização de amostras para o processamento na Planta Piloto, que é objeto de estudo da presente pesquisa.

4.2 – Origem e coleta do bagaço de cana-de-açúcar processado na Planta Piloto

Todo o bagaço de cana-de-açúcar utilizado como substrato de pesquisa foi coletado na usina de produção de álcool Alpha Destilaria Ltda., localizada no município de Cláudio – MG.

As coletas de bagaço foram feitas em dias típicos de trabalho da Usina, sendo coletado o material “fresco”, gerado imediatamente após a moagem da cana-de-açúcar, ou seja, todas as amostras foram coletadas no exato momento em que eram geradas na etapa de moagem.

Considerando-se a pilha de estocagem de bagaço recém gerado, na Alpha Destilaria, foi recolhido material de diferentes partes da pilha, de forma a se obter amostras mais representativas.

Deve ainda ser considerado o fato de que o bagaço de cana gerado se constitui em um material homogêneo física e quimicamente, gerado sob as mesmas condições operacionais da Usina. Observa-se também que a própria Usina realiza diversos ensaios físico-químicos no bagaço gerado, de forma que é possível assegurar, com base nestes testes, a semelhança das

amostras coletadas para o processamento na planta piloto, garantindo uma uniformidade nas suas condições operacionais.

Foram realizadas, ao todo, quatro (4) coletas de amostras de bagaço de cana-de-açúcar, em datas distintas. Em cada data de coleta, foi recolhido o bagaço proveniente de uma determinada “variedade” de cana-de-açúcar, em função da produção do dia em questão. A seguir é apresentada a relação das datas de coleta, e respectivas variedades de cana:

- 11/agosto/2009: coleta de bagaço proveniente da variedade RB 855536;
- 05/outubro/2009: coleta de bagaço proveniente da variedade RB 72454;
- 28/novembro/2009: coleta de bagaço proveniente da variedade SP 801816;
- 15/dezembro/2009: coleta de bagaço proveniente da variedade RB 855536.

Estas coletas foram feitas conforme a necessidade de processamento na planta piloto. Todo o bagaço coletado foi acondicionado em sacos plásticos, e imediatamente transportado até as instalações da UFMG, em Belo Horizonte, sendo armazenado sob refrigeração.

A temperatura máxima de refrigeração admitida foi de 4 °C, sendo a mínima de 0°C. Esta diferença entre as temperaturas se deve ao fato de que, em virtude do grande volume de bagaço coletado, foram necessárias diferentes unidades de refrigeração para o acondicionamento deste substrato, as quais apresentavam diferentes capacidades de refrigeração. Uma temperatura de até 4 °C é suficiente para que a degradação biológica do bagaço seja inibida.

Até o seu processamento na planta piloto, todo o resíduo foi mantido refrigerado.

Em cada dia de coleta, foi recolhido, aproximadamente, um volume suficiente para a operação de cerca de 4 (quatro) ciclos operacionais da Planta Piloto, ou seja, cerca de 800 litros de material.

As figuras 4.1 a 4.6 mostram a pilha de estocagem de bagaço recém gerado na Usina, bem como o momento da coleta de algumas amostras.



Figura 4.1 - Geração de bagaço de cana de de-açúcar na Usina - pilha de bagaço recém gerado (ao fundo, disposição de bagaço “antigo”)



Figura 4.2 - Geração de bagaço de cana-açúcar na Usina – pilha de bagaço recém gerado – foto 2



Figura 4.3 - Geração de bagaço de cana de açúcar na Usina - pilha de bagaço recém gerado – foto 3



Figura 4.4 - Geração de bagaço de cana de açúcar na Usina - pilha de bagaço recém gerado – foto 4 – detalhe



Figura 4.5 - Coleta de bagaço de cana de açúcar – 11/08/2009 – foto 1



Figura 4.6 - Coleta de bagaço de cana de açúcar – 11/08/2009 – foto 2

4.3 – Caracterização físico-química do bagaço de cana-de-açúcar

A caracterização físico-química do bagaço de cana é necessária tanto para se conhecer e caracterizar o substrato inicial processado na planta piloto, como para o cálculo do balanço de massa global do processo. Os resultados operacionais obtidos com o funcionamento da planta, juntamente com a comparação entre os substratos inicial e final determinarão a eficiência do processo implementado. Algumas propriedades do bagaço ainda são necessárias para a determinação de parâmetros operacionais da planta piloto, como a taxa de circulação das soluções, no 1º e 2º estágios.

Desta forma, a caracterização físico-química do bagaço de cana é necessária tanto na etapa inicial do processo (bagaço gerado na Usina, o qual compreende o substrato de entrada na planta piloto), bem como na etapa final (bagaço após processamento na planta piloto).

Observa-se que a partir da avaliação destes resultados, é possível estimar a quantidade de material orgânico digerido durante o processo, com a elaboração de um balanço de massa e energia do sistema.

Os parâmetros físico-químicos necessários para a caracterização do bagaço de cana são considerados como:

- Composição imediata (umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo)
- Matéria orgânica seca;
- Composição básica: teor e composição das fibras, sólidos solúveis (brix) e açúcares redutores totais (ART);
- Energia bruta e poder calorífico inferior – PCI.

Apenas para melhor entendimento, a tabela 4.1 apresenta a relação da composição química imediata e a matéria orgânica seca.

Tabela 4.1 – Relação entre os parâmetros da composição imediata e a matéria orgânica

seca	
Parâmetros da composição imediata	Correlação com o parâmetro matéria orgânica seca
Umidade	-
Carbono fixo	Matéria orgânica seca (ou sólidos voláteis)
Materiais voláteis	
Cinzas	-

A matéria orgânica seca (ou sólidos voláteis) constitui-se no somatório do carbono fixo e materiais voláteis.

Considerando-se os parâmetros medidos na composição imediata (Tabela 4.1), ressalta-se que, uma vez retirada a umidade do material analisado, o somatório dos parâmetros carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, é de 100%. Ou seja, os resultados (%) dos parâmetros carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, já são dados em base seca (desconsiderando-se a umidade da amostra), ou seja:

$$\text{Massa da amostra seca (g)} = \text{Carbono Fixo (g)} + \text{Materiais Voláteis (g)} + \text{Cinzas (g)} = 100\%$$

Por sua vez, o somatório do carbono fixo e materiais voláteis, corresponde ao teor de matéria orgânica seca do material.

4.3.1 – Composição imediata

A composição imediata do bagaço de cana se constitui na determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Estas análises foram feitas com base nas determinações da Norma ABNT NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata, outubro/1986. Esta Norma foi utilizada como referência, em função da inexistência de metodologia similar, específica para o bagaço de cana.

Em relação ao teor de umidade do bagaço inicial (não processado na planta piloto), este valor foi, inicialmente, fornecido pela Alpha Destilaria Ltda., no momento em que as respectivas amostras foram coletadas na Usina (metodologia reportada em CTC – Centro de Tecnologia Canavieira, 2005). Desta forma, as análises posteriores, realizadas em laboratório do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA/UFMG, serviram para confirmação dos valores de umidade fornecidos inicialmente.

Quanto à umidade do bagaço final (após processamento na planta piloto), esta foi determinada em laboratório do DESA/UFGM, e posteriormente medida no laboratório da Alpha Destilaria Ltda.

A coleta de amostras para realização destes ensaios foi feita conforme a Norma ABNT NBR 10007 - 2004 - Amostragem de Resíduos Sólidos.

4.3.1.1 – Determinação da umidade

A Usina onde foi coletado o bagaço de cana realiza ensaios de caracterização deste substrato a cada 2 (duas) horas, durante 24 horas/dia, 7 dias/semana. Dentre os ensaios realizados, está o teor de umidade.

Na ocasião de cada uma das 4 (quatro) coletas de bagaço realizadas, foram disponibilizados os teores de umidade mais recentes, correspondentes à última amostra então analisada na Usina.

Considerando-se, por sua vez, o bagaço final (após processamento na planta piloto), este também foi submetido a análises físico-químicas na Alpha Destilaria Ltda., dentre os quais a determinação da umidade.

Paralelamente às análises realizadas na Usina, tanto o bagaço inicial (coletado e acondicionado sob refrigeração), como o bagaço final (processado na planta piloto), foram submetidos a ensaios no DESA/UFGM para determinação de sua umidade.

A realização destes ensaios “adicionais” ocorreu, primeiramente, em virtude da necessidade de outros ensaios físico-químicos no bagaço, objetivando-se, desta forma, uma confirmação dos valores de umidade no momento em que as demais análises eram realizadas. Adicionalmente, as análises de materiais voláteis e cinzas, são realizadas com o substrato seco, o que também determina a necessidade do processo de secagem do mesmo.

A seguir são mencionadas as metodologias de análise realizadas na Usina e no laboratório UFGM.

Determinação da Umidade - Usina

A determinação da umidade se deu conforme metodologia reportada em CTC – Centro de Tecnologia Canavieira (2005). Foi utilizado o método da estufa elétrica.

Segundo a metodologia reportada em CTC – Centro de Tecnologia Canavieira (2005), não há necessidade de redução granulométrica adicional no bagaço, para a realização do ensaio de umidade.

Determinação da umidade – DESA/UFMG

A determinação da umidade do bagaço se deu com base na Norma ABNT NBR 8112, conforme mencionado anteriormente.

Para a determinação da umidade, também não foi realizada redução granulométrica no bagaço.

Ressalta-se que os valores de umidade obtidos no laboratório também serviram para confirmar os valores medidos na Usina (no caso do bagaço inicial), e vice-versa (no caso do bagaço final processado).

4.3.1.2 – Determinação dos materiais voláteis

Como parte da composição imediata das amostras de bagaço, a determinação dos materiais voláteis foi efetuada com base nas determinações da Norma ABNT NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata, outubro/1986.

A determinação do teor de materiais voláteis foi feita em triplicata, para cada amostra de bagaço analisada. Para este ensaio, foi utilizada amostra previamente seca, e reduzida a uma granulometria entre 0,150 e 0,210 mm. A moagem das amostras previamente secas foi feita através de moinho de rolos e peneiramento na granulometria adequada, no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

Deve ser observado que o teor de materiais voláteis determinado correspondeu ao seu teor na amostra em seu estado natural (contendo umidade natural), ou seja, em base úmida. O teor de materiais voláteis em base seca pode ser calculado posteriormente.

4.3.1.3 – Determinação das cinzas

Como parte da composição imediata das amostras de bagaço, a determinação do teor de cinzas foi efetuada com base nas determinações da Norma ABNT NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata, outubro/1986.

Esta determinação também foi feita em triplicata, para cada amostra de bagaço analisada. Para este ensaio, foi utilizada amostra previamente seca, e reduzida a uma granulometria inferior a 0,210 mm. A moagem das amostras previamente secas foi feita através de moinho de rolos e peneiramento na granulometria adequada, no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

Deve ser observado que o teor de cinzas determinado correspondeu às cinzas da amostra em seu estado natural (contendo umidade natural), ou seja, em base úmida. O teor de cinzas em base seca pode ser calculado posteriormente.

4.3.1.4 – Determinação do carbono fixo

O teor de carbono fixo constitui-se em uma medida indireta, sendo calculado de acordo com a equação 4.1:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

CF = teor de carbono fixo (%);

CZ = teor de cinzas (%);

MV = teor de materiais voláteis (%).

Deve ser observado que o teor de carbono fixo determinado correspondeu ao seu teor na amostra em seu estado natural (contendo umidade natural), ou seja, em base úmida, uma vez que o somatório dos teores dos parâmetros mencionados, incluindo a umidade, é 100%. O teor de carbono fixo em base seca pode ser calculado posteriormente.

4.3.2 – Determinação da Matéria Orgânica Seca

Visando o correto funcionamento da planta piloto de geração de biogás, as taxas de circulação de água / solução nos estágios 01 e 02 – hidrólise/acidogênese e acetogênese/metanogênese, foram determinadas a partir da matéria orgânica seca do substrato.

A determinação da matéria orgânica seca foi feita com base nos resultados obtidos da composição imediata do bagaço de cana, a partir da Norma ABNT NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise imediata.

Segundo Busch (2008), o parâmetro matéria orgânica seca é dado pela diferença entre a massa total do substrato, e os teores de umidade e cinzas, conforme equação 4.2:

$$\text{MOS} = 100 - (\text{TU} + \text{CZ}) \quad (\text{Eq.4.2})$$

Onde:

MOS = matéria orgânica seca (%)

TU = umidade (%), base úmida

CZ = cinzas (%)

Para cada uma das cargas de bagaço coletadas ao longo do segundo semestre/2009, foi determinada a matéria orgânica seca do substrato.

Em relação aos teores de umidade e cinzas utilizados nos cálculos, estes corresponderam aos valores médios obtidos nos ensaios realizados, segundo cada carga analisada.

A partir da determinação da matéria orgânica seca, foram também determinadas as taxas de circulação das soluções na planta piloto: taxa de percolação de solução nos tanques de hidrólise e taxa de bombeamento para o reator anaeróbio. Um maior detalhamento do cálculo destas taxas será apresentado posteriormente.

4.3.3 – Composição básica

4.3.3.1 – Teores de Umidade, Fibras, Sólidos Solúveis (brix) e Açúcares Redutores Totais (ART)

Conforme o CTC – Centro de Tecnologia Canavieira (2005), a composição básica do bagaço de cana é constituída pelos seguintes constituintes:

- Umidade;
- Fibras;
- Sólidos solúveis (brix).

O somatório, em percentual, destes três componentes, é de 100%.

Considerando-se os sólidos solúveis (brix) presente no bagaço, parte destes, por sua vez, é constituída pelos Açúcares Redutores Totais – ART. A definição de Açúcares Redutores e Açúcares Redutores Totais é dada conforme SINDASUCAR (2010):

- Açúcares Redutores: açúcares que reduzem o íon cúprico para óxido cuproso, do licor Fehling. Em sua grande maioria, esses açúcares são monossacarídeos, em especial a glucose e a frutose, presentes tanto na cana-de-açúcar e no açúcar comercial, como nos produtos intermediários e fluidos do processo na indústria açucareira e alcooleira.

- Açúcar Redutor Total – ART: constitui-se no teor de açúcares redutores de um produto açucarado, do qual toda a sacarose foi desdobrada em glucose e frutose.

Segundo Mattos (1991), o monitoramento de açúcares redutores totais, ART, é de grande importância para controle industrial da fabricação de açúcar e de álcool, principalmente no que se refere à melhoria da eficiência do processo industrial, ao pagamento da cana-de-açúcar em função do teor de sacarose, e à avaliação do estado de maturação da cana.

Este mesmo parâmetro – ART – está sendo considerado como o teor de “açúcar total” presente no bagaço de cana.

Desta maneira, visando à caracterização do bagaço de cana antes e após o seu processamento na planta piloto de duplo estágio, foram analisados os seguintes parâmetros:

- Teor de umidade (%)
- Teor de fibras (%)
- Teor de sólidos solúveis (Brix - %)
- Teor de Açúcares Redutores Totais (ART - %).

Todas estas análises do bagaço de cana-de-açúcar foram realizadas pela Alpha Destilaria, mesma usina de coleta do substrato de processamento na planta piloto.

Para a realização das análises mencionadas, foram utilizadas as metodologias descritas pelo Centro de Tecnologia Canavieira – CTC, por sua vez em conformidade com as metodologias estabelecidas pelo CONSECANA - Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (2006). 5ª Edição, Piracicaba/SP, 2006.

4.3.3.2 - Composição das fibras na cana

A composição das fibras na cana constituiu-se na determinação do percentual de lignina, celulose e hemiceluloses do bagaço inicial (recém coletado na Usina) e do bagaço final (processado na planta piloto).

Todas estas análises foram realizadas pelo Laboratório de Nutrição Animal da Escola de Veterinária da UFMG, sendo aplicado o método de Goering & Van Soest (1970).

Inicialmente, em virtude da semelhança físico-química entre as amostras de bagaço coletadas na Usina, estimou-se que fosse suficiente analisar a composição das fibras somente em parte das amostras de bagaço inicial (pelo menos 70% das amostras). Desta forma, a primeira amostra a ser analisada para este parâmetro foi o bagaço coletado em 05/outubro/2009 (2ª coleta) – variedade RB 72454.

4.4 – Construção e Montagem da Planta Piloto

A construção e montagem da planta piloto foram realizadas conforme estabelecido no processo Busch & Sieber (2006), porém com algumas particularidades. A sua montagem e dimensionamento foram feitos com orientação de profissionais da Universidade alemã - Brandenburgische Technische Universität Cottbus, que possui projetos vinculados ao processo.

A construção e a montagem da planta piloto foram realizadas em um Projeto RETEC/Fapemig. Conforme Silveira (2008), fizeram parte deste Projeto, inicialmente, o dimensionamento e a construção de todos os módulos individuais do aparato experimental. Inclui-se nesta etapa a elaboração, o dimensionamento e construção de todo o sistema de automação do processo, circuitos hidráulicos e elétricos. Posteriormente à construção dos módulos individuais do aparato, procedeu-se à inoculação do reator anaeróbio. Finalmente, após a etapa de inoculação, foi realizada a montagem final da planta, através da conexão dos módulos construídos e incorporação de infra-estruturas complementares, como tubulações, conexões hidráulicas e de gás, e equipamentos de medição.

Como módulos individuais do aparato, podem ser mencionados:

- 01 (um) reator anaeróbio de metanogênese;
- 02 (dois) tanques de hidrólise;

- 01 (um) sistema de aquecimento e controle da água circulada nas serpentinas do reator anaeróbio;
- 01 (um) tanque pulmão;
- 01 (um) tanque de estocagem;
- 01 (um) sistema de aquecimento da solução do tanque pulmão;
- Bombas de circulação de soluções;
- Plataforma de base para montagem dos circuitos elétricos e eletrônicos.

Um desenho esquemático da planta piloto é apresentado na figura 4.7, onde podem ser observados os principais módulos individuais mencionados. Posteriormente, a figura 4.8 apresenta uma foto da planta piloto já montada, em estágio inicial de operação.

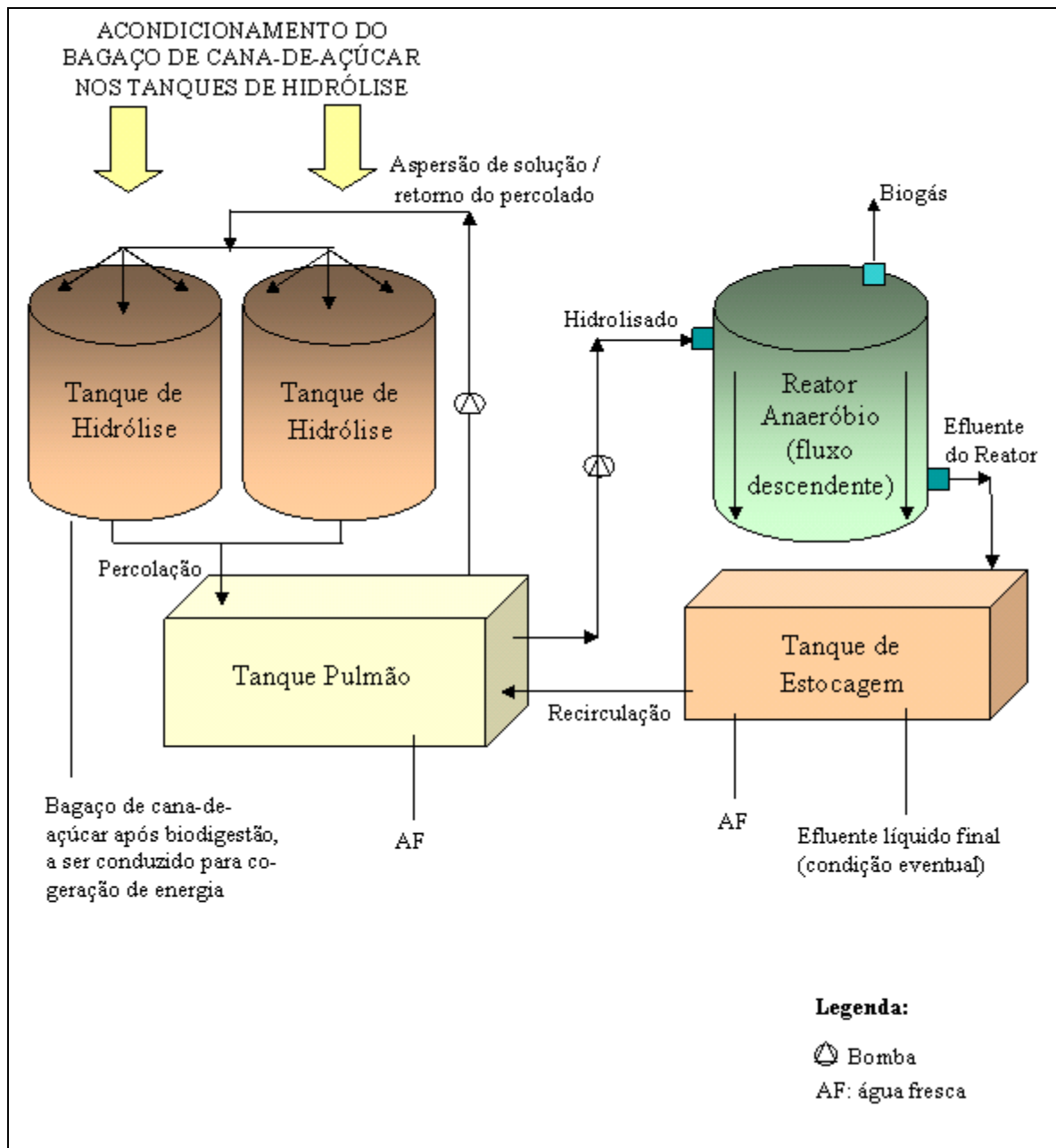


FIGURA 4.7 – Desenho esquemático da planta piloto de geração de biogás através do processo de duplo estágio – processo em batelada

FONTE: Adaptado de Silveira (2008).

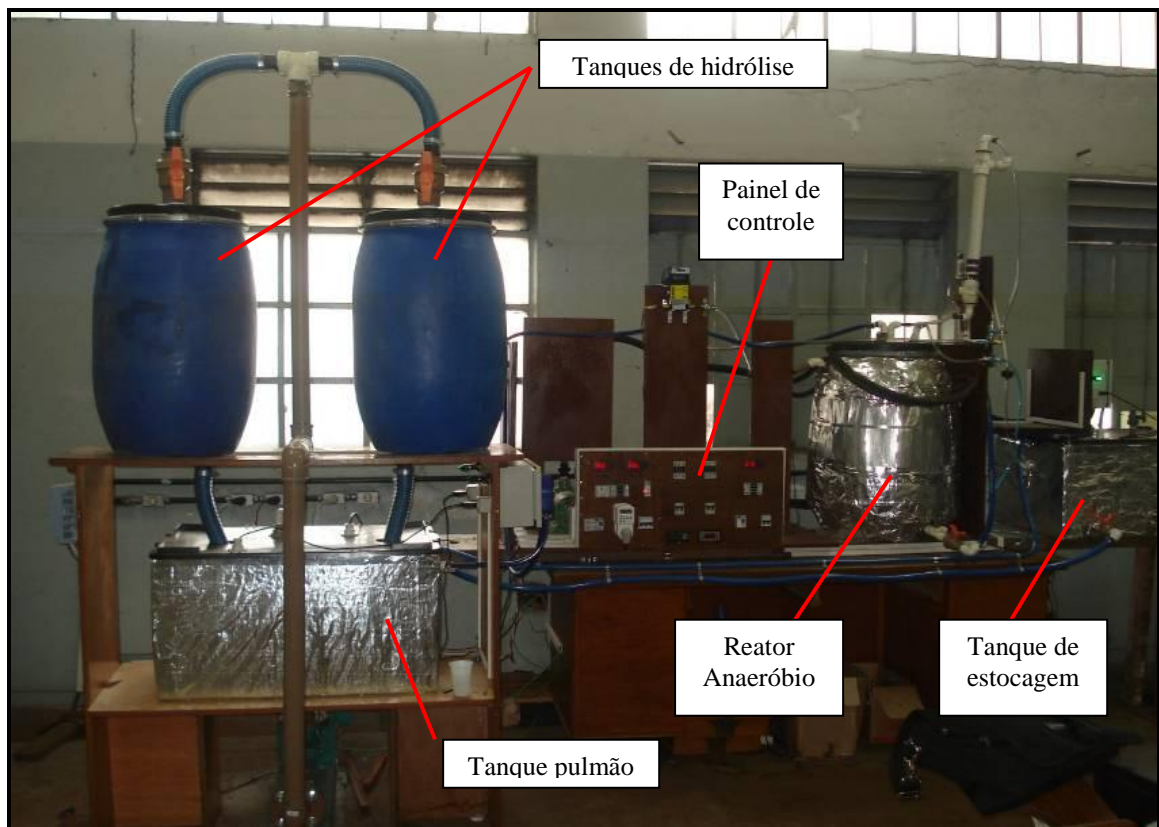


Figura 4.8 – Planta piloto montada e em estágio inicial de operação

A seguir são apresentadas algumas considerações sobre os principais módulos individuais da planta piloto, sendo posteriormente descritos o processo de inoculação do reator anaeróbio, e a montagem final da planta.

4.4.1 – Módulos individuais principais da planta piloto

4.4.1.1 - Tanques de hidrólise

Segundo Silveira (2008), foram utilizados como base para os tanques de hidrólise, tanques cilíndricos de material plástico com um volume interno de 120 litros. Os dois tanques de hidrólise foram montados em paralelo.

Na parte inferior (base) dos tanques de hidrólise, foram acopladas telas perfuradas de aço inox, em formas de discos de 47 cm de diâmetro, furos de 10 mm, instaladas sobre bases cilíndricas de nylon. Estas telas tiveram a função de reter o material sólido no interior dos tanques. No caso destes tanques de hidrólise, foram ainda adaptadas sobre as telas, mantas plásticas perfuradas, objetivando-se reduzir o diâmetro dos furos para 3 mm, para melhor retenção de partículas lixiviadas (Figuras 4.9 e 4.10).



Figura 4.9 – Colocação de tela na base dos tanques – foto 1

Fonte: Silveira (2008)

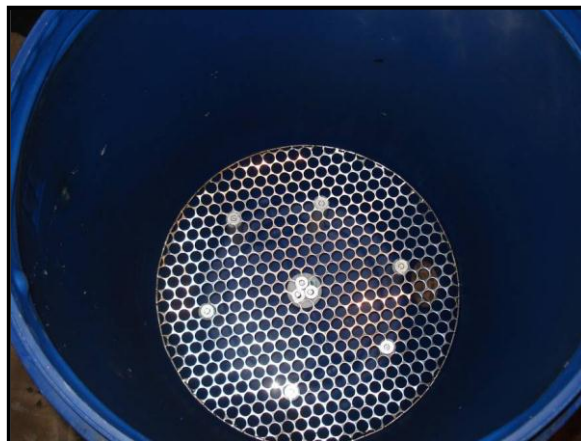


Figura 4.10 – Colocação de tela na base dos tanques – foto 2

Fonte: Silveira (2008)

4.4.1.2 - Reator anaeróbio

Conforme informado para os tanques de hidrólise, foi utilizado, para a construção do reator anaeróbio, um tanque cilíndrico de material plástico, com um volume interno de 120 litros.

A confecção do reator anaeróbio envolveu a instalação de uma conexão de PVC em sua lateral, próximo da base para adaptação da tubulação de um sifão. O sifão possibilita o reator operar com 80% de seu volume “afogado”. A entrada da solução de digestão no reator ocorre na parte superior do mesmo, e a saída na parte inferior.

Esta configuração do reator (entrada de solução na parte superior, e saída na porção inferior), foi confirmada durante os testes de comissionamento da planta piloto, antes de sua entrada em operação definitiva. As tentativas em se operar o reator com fluxo ascendente, durante estes testes, resultaram em oscilações das medições de vazão no medidor digital. Estas oscilações foram causadas devido aos gradientes de pressão dos pontos de entrada e saída do reator, os quais influenciavam a vazão de biogás na saída deste aparato. Deve ser observado que, considerando-se a entrada de solução na parte superior do reator, foi acoplada uma estrutura física similar a uma tela perfurada, visando à distribuição uniforme da solução de entrada no equipamento.

Com o objetivo de se manter sua temperatura interna média em 37 °C, foram instaladas duas serpentinas de cobre, em espiral, na parte externa do reator, em cujo interior ocorreu a

circulação de água aquecida. A instalação das serpentinas na parte externa do reator ocorreu de forma a se evitar o contato direto do metal com os microrganismos dispostos no reator, e assim um possível choque térmico, e possível ataque corrosivo sobre o metal (Figura 4.11).

Em virtude da instalação externa das serpentinas, a perda térmica da estrutura seria significativa. Foi necessário, portanto, a utilização de um isolamento térmico para o reator. Este isolamento foi feito por meio de um revestimento com lã de rocha recoberta com uma chapa de alumínio corrugado.

Conforme mencionado para os tanques de hidrólise, na parte inferior (base) do reator anaeróbio, foram acopladas telas perfuradas de aço inox, em formas de discos de 47 cm de diâmetro, furos de 10 mm, instaladas sobre bases cilíndricas de nylon. Estas telas tiveram a função de reter o material sólido no interior do reator (Figuras 4.9 e 4.10).

No topo do reator e dos tanques também foram instaladas conexões hidráulicas: conexão de saída de gás (metanogênese) e registros de controle (hidrólise).

Considerando-se o material de recheio do reator, foi utilizado o material de suporte biológico Bioflow 40, da empresa Rauschert. Tratam-se de “pastilhas plásticas” com as seguintes especificações técnicas: superfície de $305 \text{ m}^2/\text{m}^3$, densidade de $91 \text{ kg}/\text{m}^3$, e dimensões de $40/45 \times 35 \text{ mm}$.



Figura 4.11 – Reator anaeróbio sendo revestido com serpentina de cobre, por sua vez coberta com fita adesiva específica

Fonte: Silveira (2008)

4.4.1.3 - Sistema de aquecimento e controle da água circulada nas serpentinas do reator anaeróbio

Visando à manutenção da temperatura interna do reator anaeróbio em 37 °C, foi desenvolvido um sistema de aquecimento e controle da água circulada nas serpentinas.

Este sistema constituiu-se em um reservatório plástico de 20 litros, acoplado a aquecedores, e onde foi acoplado um isolamento com uma camada de “asfalto líquido” e manta asfáltica (isolamento principal). Para o aquecimento, foram empregados dois ebulidores domésticos de 2000 W cada, fixados à tampa superior do reservatório térmico. A utilização de dois ebulidores foi feita visando à segurança do processo, em caso de pane no equipamento e/ou necessidade de manutenção no mesmo (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Detalhe do sistema de aquecimento da água de aquecimento do reator anaeróbio

Fonte: Silveira (2008)

4.4.1.4 – Tanque pulmão e tanque de estocagem

O tanque pulmão, utilizado para estocagem da solução de percolação nos tanques de hidrólise, foi construído a partir de uma caixa retangular de material plástico, contendo um volume aproximado de 200 litros.

Neste tanque pulmão foi empregado um material de isolamento térmico, constituído por placas de isopor coladas e manta plástica prateada de acabamento. Foram ainda acopladas conexões hidráulicas, bem como um sistema de aquecedores, constituído por 2 (duas)

unidades de aquecedor de 250 W cada, utilizadas originalmente em aquários, e adaptados ao tanque através de conexões específicas.

Os aquecedores presentes aquecem a solução bombeada para os tanques de hidrólise, mantendo-a em uma temperatura ideal de 30 °C, podendo, no entanto, ser ligeiramente inferior a este valor (recomendado não abaixo de 25°C).

Considerando-se o tanque de estocagem, este recebe o efluente proveniente do reator anaeróbio, sendo diretamente interligado ao sifão deste reator, e possuindo ainda uma interligação com o tanque pulmão. Sua construção foi bastante similar à do tanque pulmão, diferindo-se apenas em alguns pontos como dimensões da caixa, posição e número de conexões e pela presença de uma borracha de vedação.

O tanque de estocagem foi construído a partir de uma caixa retangular de material plástico, contendo um volume aproximado de 130 litros. Este tanque foi revestido com material constituído por placas de isopor coladas e manta plástica prateada de acabamento. Foram ainda acoplados aquecedores de suporte, também similares aos utilizados no tanque pulmão, porém com potência mais reduzida (60 W). Estes aquecedores foram utilizados como suporte durante a inoculação do reator anaeróbio, com a finalidade de se evitar choques térmicos. Uma vez concluída a inoculação, os mesmos podem ser “definitivamente” desligados.

4.4.1.5 – Sistema de bombeamento de circulação de soluções

Considerando-se os diversos módulos individuais, bem como a interconexão entre os mesmos, foram implantados diversos sistemas de bombeamento na planta piloto, incluindo bombas peristálticas, motobombas monofásicas e trifásicas.

Todo o sistema de aquecimento e bombeamento foi controlado por um sistema de automação desenvolvido especificamente para a planta piloto.

4.4.1.6 – Plataforma de base

A montagem de todo o circuito elétrico e eletrônico foi feita em uma plataforma de base, com o objetivo de se unir todos os componentes de maneira compacta e funcional.

Após a conclusão da plataforma, foi possível a instalação de todo o sistema hidráulico de aquecimento, e a reunião, em um único painel de controle, de todo o sistema de automação.

4.4.2 – Inoculação do reator anaeróbio

O reator anaeróbio foi, inicialmente, preenchido com material de suporte, constituído por pastilhas, para fixação do meio biológico. Foi utilizado o material de suporte biológico Bioflow 40, da empresa Rauschert. Tratam-se de “pastilhas plásticas” com as seguintes especificações técnicas: superfície de $305 \text{ m}^2/\text{m}^3$, densidade de $91 \text{ kg}/\text{m}^3$, e dimensões de $40/45 \times 35 \text{ mm}$.

A inoculação inicial do material de suporte no interior do reator foi feita através da circulação de uma solução feita a partir de água e esterco bovino. O esterco bovino foi escolhido devido ao fato de os microrganismos presentes em seu trato intestinal serem constituídos, em grande parte, por microrganismos metanogênicos.

A preparação da solução de esterco e água foi feita da seguinte maneira: foi coletado esterco bovino fresco, sendo o mesmo misturado à água em uma proporção, aproximada, de 40% (em volume) de esterco e 60% (em volume) de água. Esta solução de esterco foi então filtrada, de forma a se obter uma consistência mais líquida, facilitando o seu bombeamento para o reator.

A solução de esterco e água, após filtragem, foi adicionada ao tanque de estocagem, até uma altura aproximada de $1/3$ (um terço) de seu volume total. Não foi necessário qualquer procedimento adicional de aclimatação do esterco e/ou solução, sendo o único cuidado tomado relacionado à utilização de esterco fresco. Por outro lado, ao reator anaeróbio, foi adicionada água pura, até o enchimento de 80% de seu volume (reator trabalhando 80% afogado).

Após o enchimento do reator com água e do acondicionamento da solução de esterco filtrada no tanque de estocagem, deu-se início ao processo de inoculação. A solução filtrada foi submetida à circulação no reator contendo o meio suporte, a uma vazão, aproximadamente, de mesma magnitude da taxa de circulação definida para o reator anaeróbio (ou seja, a mesma vazão/taxa de circulação definida para o 2º estágio do processo, a ser detalhada no item 4.5.1). Esta taxa de circulação, no caso, correspondente a 7 L de solução por kg matéria orgânica seca de bagaço por dia. Observa-se que o cálculo desta taxa envolve o conhecimento da quantidade de matéria orgânica seca – MOS do bagaço de cana que estaria acondicionada nos tanques de hidrólise. Desta forma, foi estimada a massa de bagaço total acondicionada nos 2 tanques de hidrólise, em conjunto, e deste valor foi estimada a quantidade de MOS presente.

Com base nesta quantidade de MOS, foi definida, então, a taxa de circulação de cerca de 7 L de solução por kg MOS por dia.

A circulação desta solução foi feita entre o reator e tanque de estocagem, durante aproximadamente 01 (um) mês.

A princípio, teria sido necessária apenas uma única inoculação do reator (inoculação inicial), para o funcionamento da planta piloto, durante todos os testes com o bagaço de cana-de-açúcar. Entretanto, no decorrer dos experimentos, foram necessárias outras reinoculações, devido a problemas operacionais no reator (redução brusca de pH), o que causou danos ao meio biológico, especialmente às arqueas metanogênicas, mais sensíveis à redução de pH.

No caso de necessidade de novas reinoculações durante os experimentos, o procedimento executado foi semelhante ao procedimento de inoculação inicial. Houve a circulação de solução filtrada, preparada a partir de água e esterco bovino, a uma vazão similar à mencionada anteriormente, e durante um período de tempo pré-determinado. Esta solução contendo esterco foi adicionada à solução presente no tanque de estocagem, no momento da reinoculação.

No caso das reinoculações, o intervalo de tempo necessário para a circulação da solução foi determinado pelo pH da solução total circulante (solução de esterco, em conjunto com a solução do tanque de estocagem). Após atingir um pH mínimo de 7,5, a circulação da solução no reator foi interrompida, sendo então todo o processo da planta piloto interligado novamente, para o processamento de nova carga de bagaço de cana-de-açúcar.

O processamento da nova carga de bagaço de cana foi então iniciado complementando-se o volume de solução circulante com “água nova”. Desta forma, não houve descarte da solução de reinoculação, e sim uma complementação da solução de circulação no processo, através da adição de água nova.

4.4.3 – Montagem final da planta piloto – montagem dos módulos individuais

Posteriormente à construção dos módulos individuais do aparato experimental, e da inoculação inicial do reator anaeróbio, foi realizada a montagem final da planta piloto, conforme figura a 4.8, apresentada anteriormente.

Para a montagem final, foi necessário o emprego de bancadas para colocação de parte do aparato. Foram ainda necessários ajustes nas instalações elétricas locais. A planta foi montada no Laboratório de Hidráulica da Escola de Engenharia da UFMG. A figura 4.8 apresenta a planta piloto montada e em estágio inicial de operação. Já as figuras 4.13 a 4.18, a seguir, apresentam as estruturas em detalhes, na planta montada.

Durante a montagem final, a plataforma contendo o painel de controle e a motobomba do sistema de aquecimento foi colocada sobre a bancada. Foram ainda instalados o reator anaeróbio, o sifão para o controle de nível do reator, o tanque de estocagem, a bomba peristáltica e os registros de gás.

À esquerda, foram instalados os tanques de hidrólise, tanque pulmão, e sistema de bombeamento e aquecimento correspondentes.

Na parede atrás da bancada, foram instaladas diversas tomadas de 127 V e 220 V. O reservatório de água aquecida foi colocado no chão entre a parede e a mesa. As conexões hidráulicas entre o reservatório motobomba e serpentinas foram concluídas.

Foram ainda acoplados ao aparato experimental, um medidor de vazão automático, bem como conexões específicas na saída do reator anaeróbio, de forma a possibilitar o acoplamento de um analisador de gases para medição dos percentuais de metano, dióxido de carbono, oxigênio, dentre outros.



Figura 4.13 – Tanques de hidrólise – detalhe



Figura 4.14 – Tanque pulmão – detalhe



Figura 4.15 – Reator anaeróbio – detalhe



Figura 4.16 – Tanque de estocagem – detalhe



Figura 4.17 – Sistema de aquecimento de água para o reator anaeróbio



Figura 4.18 – Painel central de controle - detalhe

4.5. Operação da Planta Piloto para o processamento de bagaço de cana-de-açúcar – aspectos operacionais e análises laboratoriais de rotina

As atividades envolvendo a operação da planta piloto englobaram a sua partida inicial, os testes de comissionamento, e a operação propriamente dita.

4.5.1 - Partida inicial da planta piloto

Para a partida inicial da planta piloto, foi feito o carregamento dos tanques de hidrólise com bagaço de cana-de-açúcar. A quantidade de bagaço acondicionada em cada tanque correspondeu ao enchimento dos recipientes, até uma altura correspondente à distância de pelo menos 5 centímetros de sua parte superior, onde está localizado o sistema de aspersão de solução interno a cada tanque. Em termos de matéria orgânica seca (kg MOS), esta quantidade foi variável para cada ciclo processado, dependendo do percentual de matéria orgânica seca da amostra de bagaço então processada, bem como da massa de bagaço acondicionada nos recipientes, que também pode ser um pouco variável.

Uma vez feito o carregamento, foi adicionada água nova ao tanque pulmão, até o preenchimento de cerca de 2/3 (dois terços) de seu volume. Foi também adicionada água nova

ao recipiente de 20 L do sistema de aquecimento do reator anaeróbio. Já o tanque de estocagem iniciou sua operação com o volume residual de solução usado na inoculação.

As temperaturas do tanque pulmão e do reator anaeróbio foram ajustadas, respectivamente, para cerca de 30 °C, e para um valor máximo de 37 °C. Este ajuste foi feito a partir do funcionamento dos aquecedores empregados.

O reator anaeróbio, já inoculado, foi mantido com 80% de seu volume “afogado”.

Em relação às taxas de circulação de água / solução no 1º e 2º estágios do processo (1º estágio - percolação nos tanques de hidrólise; 2º estágio – bombeamento da solução do tanque pulmão para o reator anaeróbio), estas são definidas, segundo Busch (2008), a partir da matéria orgânica seca do substrato processado. Foram aplicadas, inicialmente, as taxas sugeridas pela Universidade de Cottbus, as quais foram obtidas em estudos da aplicação do processo Busch & Sieber (2006). Inicialmente constituída por água, a solução circulante vai se tornando, ao longo do tempo, enriquecida com os compostos orgânicos lixiviados.

A taxa de circulação no 1º estágio foi definida como uma taxa diária de 100 litros de solução por kg MOS do substrato – MOS, ou seja, 100 L por kg MOS por dia. Esta taxa corresponde a um valor “universal”, atualmente aplicado a todas as unidades de planta piloto em operação, para os diversos substratos.

Considerando-se, por sua vez, a taxa de bombeamento da solução do tanque pulmão para o reator anaeróbio (2º estágio), esta foi definida, inicialmente, como uma taxa diária mais reduzida, de aproximadamente 1 litro de solução / quilograma de matéria orgânica seca do substrato – MOS, ou seja, 1 L por kg MOS por dia. A aplicação de uma taxa reduzida no início do processo é essencial para um equilíbrio do meio biológico no reator. Esta taxa de circulação foi aumentada gradualmente, pouco a pouco, ao longo deste primeiro ciclo operacional da planta piloto. O objetivo final era se chegar a uma taxa diária de 7 litros de solução por kg MOS do substrato – MOS, ou seja, 7 L por kg MOS por dia. Esta taxa corresponde à taxa aplicada para o processamento de milho como substrato em planta piloto similar, segundo dados informais (comunicação pessoal) da Universidade de Cottbus – BTU.

As taxas de circulação são determinadas para o período diário, não havendo necessidade, porém, de serem aplicadas taxas contínuas durante todo o dia. Além disso, o próprio sistema de bombeamento disponível não seria capaz de manter uma circulação constante de vazões extremamente reduzidas.

Desta forma, para cada sistema de circulação de água / solução (1º e 2º estágios), cada sistema de bombeamento foi programado para funcionamento durante um determinado intervalo de tempo, a periodicidades específicas, de forma a se obter uma circulação total de 100 L por kg MOS por dia e 1 L por kg MOS por dia (inicialmente), respectivamente. Nesta etapa, também foram realizadas análises laboratoriais, em triplicata, para a determinação do teor de matéria orgânica seca – MOS do substrato. Foram calculadas as taxas de circulação em termos de “litros / dia”, para programação do sistema de bombeamento.

O número de ciclos de circulação e sua duração foram definidos de acordo com a frequência operacional de cada bomba, o qual define uma vazão específica de bombeamento. A partir do conhecimento da vazão proporcionada por cada sistema de bombeamento, foram feitos os cálculos da quantidade de ciclos necessários e sua duração, de forma a perfazer a taxa total diária recomendada. Podem ser programados, por exemplo, 8 ciclos diários de 10 minutos cada, onde o total de água / solução circulada correspondesse à taxa diária recomendada.

Uma vez programadas as taxas de circulação de água / solução, foi dada a partida inicial da planta. Este primeiro ciclo operacional apresentou uma duração de cerca de 15 dias. Durante este período, a taxa de circulação de solução do 2º estágio (bombeamento para o reator) foi sendo aumentada gradativamente, até um valor aproximado de 3 L por kg MOS por dia. Somente nos ciclos operacionais posteriores a este ciclo inicial é que foi possível elevar esta taxa até 7 L por kg MOS por dia. Observa-se que, para cada alteração da taxa de circulação de solução, uma nova programação do sistema de bombeamento foi feita.

Embora toda a definição das taxas de circulação seja feita, segundo Busch (2008), a partir da matéria orgânica seca, os valores definidos podem ser convertidos em outras unidades correspondentes, como “litros solução / volume útil do reator anaeróbio”, que pode ainda ser detalhada em termos de “massa de carga orgânica / volume útil do reator anaeróbio * dia”. Considerando-se a massa da carga orgânica, esta pode ser considerada como a Demanda Química de Oxigênio – DQO inicial (medida no primeiro dia do ciclo), na solução do tanque pulmão, e expressa em kg/dia. A solução do tanque pulmão corresponde à solução de entrada no reator anaeróbio, ou seja, representa a carga orgânica que o reator recebe.

Esta “segunda unidade” pode ser usada, particularmente, para o 2º estágio do processo, referente ao bombeamento da carga orgânica existente na solução, para o reator.

Desta forma, considerando-se que cerca de 80% do volume do reator constitui-se em volume útil (volume contendo as pastilhas onde estão aderidos os microrganismos anaeróbios), tem-se um volume útil de cerca de 96 litros. A taxa de circulação, calculada na nova unidade, é determinada em cada batelada do processo. Desta forma, a concentração de DQO inicial (mg O₂/L), é multiplicada pelo volume total de solução bombeada para o reator anaeróbio, por dia, obtendo-se o valor de DQO em kg/dia. Para o cálculo do volume total de solução bombeado para o reator anaeróbio, diariamente, o valor em L de solução por kg MOS por dia é multiplicado pela quantidade de MOS, de forma a se obter a taxa em L / dia. Este valor é então multiplicado pela DQO inicial da solução do tanque pulmão, medida no 1º dia de cada ciclo. A DQO inicial da solução do tanque pulmão representará a carga orgânica máxima de entrada no reator. Este último valor obtido (kg DQO/dia) é então dividido pelo volume útil do reator, fornecendo a taxa em: kg DQO máxima por m³ volume útil por dia.

Durante todo o ciclo operacional inicial, foi feito acompanhamento diário do pH das soluções do tanque pulmão e tanque de estocagem, bem como foram feitas medições da composição do biogás de saída do reator anaeróbio (a metodologia para realização destas análises é apresentada no item 4.5.3). Adicionalmente, foi feito um acompanhamento de todos os parâmetros operacionais da planta piloto (temperatura, sistemas de bombeamento, etc).

A estabilização da quantidade do metano acumulado no biogás indicou o momento de se interromper o processamento deste primeiro ciclo operacional. Ressalta-se que, no período de finalização deste ciclo, foi coletada uma amostra do biogás produzido (coleta feita por seringa descartável). A amostra coletada foi analisada, em triplicata, através de cromatografia gasosa, para determinação da composição do biogás então produzido.

O ensaio de cromatografia gasosa foi feito segundo a seguinte metodologia:

- Equipamento: Perkim Elmer XL / Coluna:60/80 Carcoxen 1000 Supelco / Detector: TCD (Detector de condutividade térmica).

As temperaturas do forno, do injetor e do detector foram, respectivamente, 200 °C, 180 °C, e 200 °C. O gás de arraste utilizado foi o Hélio a 20 mL/min. O tempo de corrida foi de 6 minutos.

Uma vez finalizado o ciclo, em virtude da estabilização do metano acumulado, o bagaço de cana então processado foi retirado dos tanques de hidrólise. Posteriormente, uma nova carga

de substrato (desta vez composto por restos de verduras, frutas e legumes), foi carregada nos tanques, dando início aos denominados testes de comissionamento da planta piloto.

4.5.2 - Testes de comissionamento da planta piloto

Os testes de comissionamento constituem-se nos testes operacionais iniciais da planta piloto, visando à adequação do processo para sua entrada em operação definitiva, com o processamento do bagaço de cana-de-açúcar.

Esta operação de comissionamento foi realizada com o processamento sucessivo de cargas de resíduos orgânicos constituídos por restos de verduras, frutas e legumes, coletados nas Centrais de Abastecimento de Minas Gerais S/A - CEASA. Estes resíduos constituem-se em substratos extremamente biodegradáveis, apresentando uma ótima resposta à produção de biogás pela digestão anaeróbia e, portanto, uma elevada aplicabilidade no aparato experimental estudado. Desta forma, estes resíduos se constituem em uma fonte bastante adequada para a otimização do processo operacional da planta piloto.

Além do estabelecimento e equilíbrio do meio biológico no reator anaeróbio, os testes de comissionamento tiveram como objetivo averiguar a eficiência operacional da planta como um todo, incluindo a parte mecânica, de automação, e hidráulica: sistemas de bombeamento, aquecedores, medidor de vazão, programadores digitais, dentre outros.

Durante todo o período de testes de comissionamento, a taxa de circulação de solução do 2º estágio (bombeamento para o reator anaeróbio) foi aumentada gradativamente, até alcançar um valor de 7 L por kg MOS por dia. Foram ainda realizadas medições periódicas de pH das soluções dos tanques pulmão e de estocagem, bem como a composição do biogás, visando um acompanhamento do processo. A diminuição gradativa do percentual de metano no biogás, até níveis considerados como reduzidos (cerca de 30%), indicou a necessidade de troca do substrato, no caso por uma nova carga de resíduos do CEASA.

Observa-se que tanto durante a partida inicial da planta piloto, bem como nos testes com resíduos do CEASA, as medições de pH e composição do biogás foram realizadas com o intuito de acompanhar o desenvolvimento, adequação e constância do processo operacional. Estas medições não se constituíram em resultados propriamente ditos, mas sim em uma etapa de preparação do aparato experimental.

O período de comissionamento da planta piloto apresentou uma duração de aproximadamente 9 (nove) meses. Neste período, foram detectados e solucionados diversos problemas em estruturas físicas do aparato, envolvendo, principalmente, os aspectos mecânicos, hidráulicos e de automação.

Em relação à configuração do reator anaeróbio, esta foi confirmada como sendo com entrada de solução na parte superior, e saída na porção inferior. Esta configuração final foi estabelecida durante os testes de comissionamento da planta piloto, após algumas tentativas em se operar o reator com fluxo ascendente. O fluxo ascendente resultou em oscilações das medições de vazão no medidor digital. Estas oscilações foram causadas devido aos gradientes de pressão dos pontos de entrada e saída do reator, os quais influenciavam a vazão de biogás na saída deste aparato. Deve ser observado que, considerando-se a entrada de solução na parte superior do reator, foi acoplada uma estrutura física similar a uma tela perfurada, visando à distribuição uniforme da solução de entrada no equipamento.

Ao final do período de comissionamento, iniciou-se a operação efetiva do aparato, com o processamento do bagaço de cana-de-açúcar.

4.5.3 – Operação de rotina da planta piloto: processamento do bagaço de cana-de-açúcar

Após a finalização dos testes de preparação, iniciou-se a operação da planta piloto utilizando-se como substrato o bagaço de cana-de-açúcar.

A planta piloto foi mantida em operação por um intervalo de tempo total de 08 (oito) meses (após o comissionamento), sendo que deste período, cerca de 02 (dois) meses foram utilizados para o procedimento de 02 (duas) reinoculações do reator anaeróbio.

O ciclo inicial de operação da planta piloto foi iniciado com a disposição do bagaço de cana-de-açúcar a ser processado nos 02 (dois) tanques de hidrólise.

As condições operacionais empregadas foram as mesmas determinadas durante a sua partida inicial, e mantidas durante o seu comissionamento.

A temperatura do reator anaeróbio foi mantida em um valor máximo de 37 °C, a temperatura do tanque pulmão em um valor próximo (e máximo) de 30 °C. O controle destas temperaturas foi feito através de sensores específicos. Uma vez identificado um abaixamento de seus

valores, os respectivos aquecedores eram acionados, promovendo o reaquecimento das estruturas.

O reator anaeróbio foi mantido em 80% de seu volume afogado. As taxas de circulação de água solução foram mantidas, a princípio, de acordo com os valores sugeridos – 100 L por kg MOS por dia e 7 L por kg MOS por dia (taxa já elevada durante o período de comissionamento), respectivamente, para o 1º e 2º estágios.

Ressalta-se que, para cada variedade de bagaço de cana coletada, foi analisado o teor de matéria orgânica seca – MOS. Desta forma, para cada a nova batelada de substrato processado, foi utilizado o teor de MOS correspondente. A cada novo ciclo, foram recalculadas as taxas de circulação total (L /dia), e reprogramados os dispositivos de controle do processo.

Em relação ao volume inicial de solução no tanque pulmão, este foi mantido em cerca de 2/3 (dois terços) de seu volume total, sendo o volume faltante completado com água nova. O tanque de estocagem iniciou sua operação com o volume residual de solução já presente neste recipiente, proveniente do ciclo de processo anterior.

Ressalta-se que, considerando-se o substrato bagaço de cana-de-açúcar, este não apresenta, em sua composição química, nutrientes suficientes para que seja garantida a biodigestão anaeróbia. Desta forma, optou-se pela adição de um suplemento de nutrientes, juntamente à água nova adicionada.

Como fonte de nutrientes, foi utilizado um fertilizante mineral misto (biofertilizante folicular), contendo 13 tipos de nutrientes. Trata-se de um fertilizante universal utilizado para o desenvolvimento de plantas em geral, incluindo hortaliças, plantas ornamentais, frutíferas, dentre outras. Os nutrientes são 100% solúveis em água. O produto utilizado foi o *BIOFERT Plus Universal*, o qual contém os seguintes percentuais de macro e micro nutrientes:

- Nitrogênio (N): 8% (96 g/L);
- Fósforo (P₂O₅ solúvel em H₂O): 6% (72 g/L);
- Potássio (K₂O): 6% (72 g/L);
- Magnésio (Mg): 0,5% (6,0 g/L);
- Enxofre (S): 1,67% (20,0 g/L);

- Boro (B): 0,01% (0,12 g/L);
- Cloro (Cl): 0,7% (8,40 g/L);
- Cobalto (Co): 0,03% (0,36 g/L);
- Cobre (Cu): 0,05% (0,60 g/L);
- Ferro (Fe): 0,1% (1,20 g/L);
- Manganês (Mn): 0,05% (0,60 g/L);
- Molibdênio (Mo): 0,03% (0,36 g/L);
- Zinco (Zn): 0,2% (2,40 g/L).

Conforme sugerido pela Universidade de Cottbus, para cada 10 litros de água nova adicionada ao processo, foram diluídos cerca de 10 mL do biofertilizante. Ressalta-se que este produto foi adicionado somente à água nova, acrescentada no tanque pulmão no início de cada ciclo de processo (a cada nova batelada de substrato).

Observa-se que, para a solução nova adicionada ao processo, foi calculada a relação DQO:N:P para cada ciclo de processo válido, sendo utilizado para os cálculos os respectivos valores de DQO obtidos inicialmente, no 1º dia do ciclo, para a etapa de hidrólise. A DQO inicial do 1º estágio foi escolhida pelo fato de ser mais elevada que a DQO inicial da metanogênese, e por este motivo mais restritiva ao consumo de nutrientes.

4.5.3.1 – Atividades de rotina e controle operacional

As atividades de rotina e controle operacional estão relacionadas ao acompanhamento do processo de biodigestão e produção de biogás, através de coletas de amostra e medições diárias, bem como algumas coletas e medições periódicas. A saber:

- *Coletas e medições diárias*

Visando um controle e acompanhamento operacional do aparato de biodigestão proposto, foram medidos e monitorados, diariamente, os seguintes parâmetros físico-químicos:

- Análise diária do pH e da Demanda Química de Oxigênio – DQO das soluções dos tanques pulmão e de estocagem;

- Volume diário de biogás produzido – vazão instantânea e volume acumulado;

- Frações parciais de gases produzidos (biogás), incluindo metano, dióxido de carbono, oxigênio e outros gases.

As medições e coletas de amostras diárias foram realizadas, preferencialmente, no mesmo horário do dia, visando um melhor controle operacional, com medições representativas. As medições e análises foram feitas com os equipamentos devidamente calibrados, e as análises químicas segundo normas laboratoriais reconhecidas internacionalmente, conforme descrito a seguir.

Análise de pH

O parâmetro pH foi medido em pHmetro digital, devidamente calibrado com as soluções padrão para pH = 4,0; pH = 7,0 e pH = 12,0.

Diariamente foi feita a coleta de uma amostra de cerca de 100 mL de ambos os tanques de processo – tanque pulmão e tanque de estocagem. Em cada amostra foi medido o pH.

A medição instantânea do pH possibilitou um controle e otimização do processo como um todo. Este controle é feito com o objetivo de se manter o processo na faixa de operação dos respectivos grupos de microrganismos.

Caso fossem verificadas alterações no pH, poderiam ser realizadas as modificações de vazão de circulação pertinentes, dentre outras que se julgasse necessárias. Se o pH do efluente do reator anaeróbio se apresentasse reduzido, por exemplo, a vazão de entrada de solução neste reator (vazão de circulação no 2º estágio – metanogênese) deveria ser diminuída, de forma que o equilíbrio do meio biológico fosse restabelecido. Como não há adição de produtos químicos visando o controle de pH, sua variação pôde ser controlada através de alterações nas taxas de circulação de soluções. Um valor reduzido de solução circulante (entrada do reator anaeróbio) também pode, eventualmente, ocasionar um decréscimo do pH, devido ao aumento da concentração de ácidos orgânicos no 1º estágio.

Por este motivo, além do fato de ser proporcionada uma segurança operacional ao processo, o nível de água nos tanques pulmão e de estocagem foi periodicamente conferido. Eventualmente, no caso de necessidade de se completar o volume com água nova, foi adicionado também o biofertilizante, na proporção sugerida anteriormente.

Análise de Demanda Química de Oxigênio - DQO

As análises de DQO total foram realizadas conforme metodologia do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20ª Edição. Foi utilizado o método colorimétrico, onde o equipamento de leitura das absorvâncias foi o espectrofotômetro portátil – HACH DR/2010, equipamento nº A99 0049743.

Observa-se que apenas a DQO total foi analisada. Não foram analisadas amostras de DQO filtradas.

Diariamente, foi feita a coleta de uma amostra de cerca de 100 mL de ambos os tanques de processo – tanque pulmão e tanque de estocagem. Cada amostra foi preservada com H₂SO₄ concentrado e armazenada sob refrigeração, até ser submetida à análise de DQO total.

A medição da DQO visa um acompanhamento da matéria orgânica digerida diariamente, e seu potencial para formação de biogás.

Medição da vazão de biogás produzido

A vazão instantânea e volume acumulado do biogás produzido foram medidas pelo totalizador volumétrico digital, conectado ao aparato experimental. Estes valores foram medidos instantaneamente, a qualquer momento, podendo ser visualizados sempre que necessário.

A anotação diária da vazão instantânea e volume acumulado, preferencialmente no mesmo horário do dia, possibilitaram uma avaliação do rendimento do processo, ao longo do tempo, em termos de volume de biogás produzido.

Os parâmetros vazão instantânea e volume acumulado de biogás produzido, juntamente ao percentual de componentes no biogás, possibilitaram um acompanhamento da eficiência da biodigestão, e conseqüente produção de gás combustível. A combinação destes fatores determinou o final do processamento de cada batelada de biomassa.

Medição do percentual dos gases no biogás produzido (medição instantânea)

Foram realizadas medições diárias das frações parciais de gases presentes no biogás, incluindo metano – CH₄, dióxido de carbono – CO₂, oxigênio – O₂, e outros gases. Atenção especial foi dada à concentração de metano, composto que determina as propriedades combustíveis do biogás.

Em relação ao biogás gerado a partir do bagaço de cana-de-açúcar, não é esperada a presença de gás sulfídrico, amônia, devido à sua composição química (pequena presença de nitrogênio e enxofre). A adição de nutrientes ao processo foi feita de forma controlada, com o objetivo de se manter constantes as concentrações destes elementos.

A medição do percentual de gases foi realizada através de um analisador de gases digital, devidamente calibrado, conectado na planta piloto (saída do reator anaeróbio) no momento da medição. A saber: *Analisador de gases digital – CDM Biogás, Serial nº BM10260/07. Pod nº BM2K2-E000-B.*

Segundo dados do fabricante, a faixa de leitura dos principais compostos é de:

- CH₄: leitura de 0 – 100%
- CO₂: leitura de 0 – 100%
- O₂: leitura de 0 – 25%

Em relação à exatidão destas leituras, esta varia conforme a concentração (%) dos compostos medidos, conforme apresentado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Exatidão das leituras do analisador de gases digital

Concentração do gás no Analisador (Leitura - %)	Exatidão das leituras		
	CH ₄	CO ₂	O ₂
0 – 5%	± 0,5%	± 0,5%	± 1,0%
5 – 15%	± 1,0%	± 1,0%	± 1,0%
15 – 100%	± 3,0%	± 3,0%	± 1,0%

FONTE: LANDTEC, 2010

O percentual de componentes do biogás, considerado em conjunto com o volume acumulado produzido, possibilitaram um acompanhamento da eficiência da biodigestão, incluindo a produção de gás combustível e quantidade de metano formada ao longo do tempo. A combinação destes fatores determinou o final do processamento de cada batelada de biomassa.

- *Coletas e medições periódicas*

Como caracterização complementar do processo de biodigestão na planta piloto, procedeu-se a uma análise química das soluções de circulação no 1º e 2º estágios, bem como o cálculo da relação DQO : N : P.

Uma caracterização inicial foi feita na solução “nova” adicionada ao tanque pulmão, constituída pela “água nova + biofertilizante” (solução composta por uma proporção de 10 litros de água nova e 10 mililitros de biofertilizante). As análises foram feitas em 03 amostras da solução, sendo analisados os seguintes parâmetros, na forma total (que neste caso coincide com a forma solúvel): nitrogênio, fosfato e sulfato. Para cada amostra coletada, foi feita uma análise simples para o nitrogênio, e uma análise em duplicata para fosfato e sulfato.

Adicionalmente, além da análise desta “solução nova”, foi realizada, a partir do 4º ciclo operacional, uma análise das soluções provenientes dos tanques pulmão e de estocagem, para os mesmos parâmetros químicos, em sua forma solúvel: nitrogênio, fosfato e sulfato. Em cada ciclo de processo, foi coletada uma amostra por tanque, aproximadamente na metade do ciclo (aproximadamente 4º dia do ciclo). As análises foram realizadas em duplicata para o sulfato e fosfato, e uma análise simples para o nitrogênio. Estas análises das soluções dos tanques foram feitas visando um acompanhamento operacional do processo.

A análise de fosfato e sulfato foi realizada através da metodologia / equipamento Cromatografia de íons / Dionex ICS -1000. Já o nitrogênio foi analisado conforme a metodologia TOC-Vcph (Total Organic Carbon Analyzer) Shimadzu.

Anteriormente à aplicação das metodologias mencionadas, as amostras foram filtradas em papel de filtro:

- Pré-filtro Sartorius AG 37070;

- Filtro Sartorius AG 37070 / Nitrato de celulose. Tamanho dos poros: 0,45 µm.

A utilização dos filtros foi recomendada devido a questões operacionais dos equipamentos de análise. De todo modo, deve ser ressaltado que os compostos analisados, adicionados, sobretudo como nutrientes ao processo, se apresentavam em sua forma solúvel.

Considerando-se ainda as análises químicas efetuadas nas soluções do 4º dia de ciclo, foi determinada, para este dia, a relação entre a DQO medida no 4º dia, a concentração de nitrogênio e a concentração de fósforo (relação DQO : N : P). Para esta determinação, a concentração de nitrogênio foi considerada como aquela medida pelo laboratório, enquanto para a concentração de fósforo, esta foi definida a partir da conversão da concentração de fosfato em fósforo (considerando que todo o fósforo existente estava contido no fosfato

analisado). Esta relação proporcionou uma caracterização do crescimento da biomassa no meio.

4.5.3.2 – Determinação da duração dos ciclos de processo

Em cada ciclo de processo, durante a biodigestão do bagaço de cana, foi sendo verificada, ao longo do tempo de processamento, uma certa estabilização da quantidade de metano acumulado no biogás, acompanhada de uma diminuição da taxa diária de produção do metano. Foi verificada, também, no período final dos ciclos, a diminuição do percentual de metano, bem como uma produção de biogás em quantidades consideradas não significativas.

Desta maneira, a finalização de cada ciclo de processo ocorreu a partir dos seguintes indicativos, em conjunto: tendência de estabilização do volume de metano acumulado, redução mais significativa da taxa diária de produção de metano, redução do percentual de metano no biogás, e redução da produção diária de biogás a valores considerados como não significativos.

Deve ser observado que, em termos de produção de biogás, o medidor de vazão utilizado apresenta um intervalo de leitura de 0 a 2 litros de gás por minuto, totalizando um valor máximo de medição de 2880 litros por dia. Considerando-se os ciclos de processo realizados, a vazão diária final de biogás chegou a valores relativamente entre 2 e 3 litros de biogás por dia, o que representa apenas 0,07 a 0,10% do valor máximo possível de medição. Estes valores foram considerados como valores de incerteza do equipamento de medição, sendo considerado que, a partir deste momento, a vazão de biogás passasse a ser considerada com mínima.

Portanto, uma vez verificadas as condições mencionadas anteriormente, o ciclo em processamento era então finalizado, sendo carregada, nos tanques de hidrólise, uma nova carga de bagaço de cana. Um novo ciclo de processo se iniciava.

O processamento sucessivo e contínuo de novas cargas de bagaço de cana foi realizado durante todo o tempo em que a planta piloto se manteve em operação.

Observa-se que, para cada variedade de cana processada (novo ciclo), todas as taxas de recirculação de solução nos estágios 1 e 2 foram recalculadas (valores distintos de MOS). Este procedimento, no entanto, não foi feito quando a nova carga de bagaço se tratava de uma

variedade anteriormente processada. Neste caso, foram utilizados os dados já disponíveis para a referida variedade.

O bagaço após processamento na planta piloto, nos diversos ciclos de processo, foi acondicionado em locais específicos, de onde, posteriormente, amostras foram retiradas para a realização das análises físico-químicas necessárias (mesmas análises do bagaço “novo”).

Observa-se que nos 04 (quatro) primeiros ciclos de processo, optou-se por submeter o substrato digerido, anteriormente às análises laboratoriais, em uma etapa de secagem natural durante um período pré-determinado (mínimo de 15 dias), para eliminação do excesso de sua umidade. Pretendia-se que esta desidratação representasse uma possível condição operacional do processo industrial de queima do bagaço digerido, sem necessidade de sua secagem com métodos que demandem grande consumo de energia, para não impactar negativamente a rota pesquisada de aproveitamento energético. Esta etapa de secagem natural, no entanto, não apresentou uma redução de umidade significativa, motivo pelo qual foi desconsiderada nos ciclos finais de processo. Desta forma, a partir do ciclo 5 de processo, assim que o bagaço processado era descarregado dos tanques de hidrólise, uma quantidade específica de amostra era coletada, e armazenada sob refrigeração a uma temperatura máxima de 4 °C. Esta refrigeração possibilitou a manutenção das características físico-químicas do bagaço gerado, até a realização das análises em laboratório.

4.5.3.3 – Controle da produção de biogás

Apesar do processo Busch & Sieber (2006) proporcionar a possibilidade da produção de biogás conforme a demanda requerida, através da utilização dos tanques pulmão e de estocagem como armazenadores de DQO na fase líquida, não foi objetivo do presente estudo este controle de produção. A operação da planta piloto foi feita com o objetivo de se averiguar os resultados da produção “máxima possível” de biogás.

4.6. Obtenção de correlações típicas de parâmetros físico-químicos para o processamento do bagaço de cana-de-açúcar

A planta piloto foi mantida em operação por um intervalo de tempo total de 08 (oito) meses, sendo que deste período, cerca de 02 (dois) meses foram utilizados para o procedimento de 02 (duas) reinoculações do reator anaeróbio.

De posse dos valores e resultados diários obtidos a partir da operação da planta piloto, puderam ser calculadas correlações diversas entre os parâmetros medidos.

As principais correlações podem ser consideradas como:

- Produção de metano acumulada diária, por quilograma de matéria orgânica seca processada;
- Produção de biogás acumulada diária (volume acumulado), por quilograma de matéria orgânica seca processada;
- Taxa diária de produção de metano;
- Evolução do percentual de metano no biogás.

Além do cálculo das principais correlações mencionadas, foram feitas outras comparações com os resultados obtidos, visando complementar o entendimento e a caracterização do processo bem como as análises dos próprios resultados:

- Produção máxima de metano, por quilograma de matéria orgânica seca processada;
- Relação entre o volume de biogás acumulado e o teor de metano;
- Evolução do percentual de gases no biogás;
- Evolução do pH dos tanques pulmão e de estocagem, ao longo do tempo;
- Evolução da DQO dos tanques pulmão e de estocagem, ao longo do tempo;
- Comparação da variação da DQO dos tanques pulmão e de estocagem com os respectivos valores de pH;
- Comparação da produção de metano e biogás em função da DQO obtida no tanque pulmão e tanque de estocagem.

Estas correlações foram obtidas, inicialmente, para cada ciclo de processo. Posteriormente, foi feita uma análise conjunta para todos os ciclos considerados como válidos, onde foram também consideradas as correlações de cada variedade de cana utilizada como bagaço inicial do processo (bagaço coletado na Usina).

Ressalta-se que a avaliação de todas as correlações mencionadas foi feita objetivando-se um entendimento do comportamento do processamento do bagaço de cana-de-açúcar na planta piloto. Esta avaliação objetivou ainda o entendimento dos principais protocolos de

funcionamento do processo Busch & Sieber (2006), através da planta piloto em operação. Já o cálculo do balanço energético, este foi feito em capítulo específico.

4.7. Cálculo dos potenciais de geração de energia das 02 (duas) rotas de processo consideradas

O cálculo do potencial de geração de energia das duas rotas de processo foi feito a partir do balanço entre o poder calorífico inferior – PCI do bagaço de cana inicial (antes do processamento na planta piloto) e final (após o processamento na planta piloto), em conjunto com os valores estimados para o PCI do biogás produzido, a partir das curvas típicas de processo obtidas.

Em relação ao bagaço de cana inicial, a determinação do PCI foi feita considerando-se amostras de cada variedade de cana do bagaço coletado na Usina, em duas condições distintas:

- Condição 1: PCI do bagaço seco (bagaço inicial e final);
- Condição 2: PCI do bagaço úmido (bagaço inicial com 50% de umidade e bagaço final com 60% de umidade).

O cálculo do balanço energético considerando-se o bagaço seco foi feito com o intuito de se verificar a geração de energia máxima a ser obtida do bagaço, uma vez que a condição ideal para queima do bagaço em fornalha, para geração de energia elétrica, deve ocorrer com o menor teor de umidade possível.

Por sua vez, o cálculo do balanço energético considerando-se o teor de umidade do bagaço foi feito com o intuito de se determinar uma condição mais real de operação. Para tal, o bagaço inicial foi considerado com um teor de 50% de umidade (teor padrão verificado na literatura e na Alpha Destilaria). Já para o bagaço final (após processamento na planta piloto), está sendo admitido um teor de 60% de umidade. O bagaço após processamento na planta piloto apresenta um teor de umidade bastante superior ao de entrada. No entanto, foi considerado que este bagaço pode passar por um processo de secagem natural, sendo admitido um teor final de 60% de umidade.

4.7.1 – Bagaço de cana-de-açúcar: determinação da energia bruta e poder calorífico inferior – PCI

Os ensaios para determinação da energia bruta do bagaço de cana-de-açúcar (bagaço novo, não processado; e bagaço após processamento na planta piloto) foram realizados pelo Laboratório de Nutrição Animal da Escola de Veterinária da UFMG.

Para estes ensaios, foi utilizada uma bomba calorimétrica - BOMBA PARR 6200 CALORIMETER.

Foram coletadas amostras representativas de bagaço novo e bagaço após processamento na planta piloto. Para estas amostras de bagaço, foi realizado um ensaio para determinação da energia bruta. Estes ensaios foram feitos com o bagaço seco.

Conforme observado para o parâmetro composição das fibras, inicialmente, em virtude da semelhança físico-química entre as amostras de bagaço coletadas na Usina, estimou-se que fosse suficiente que a análise de energia bruta fosse realizada somente em parte das amostras de bagaço inicial (pelo menos 70% das amostras). Desta forma, a primeira amostra a ser analisada para este parâmetro foi o bagaço coletado em 05/outubro/2009 (2ª coleta) – variedade RB 72454.

Os resultados obtidos para a energia bruta do *bagaço seco* correspondem ao poder calorífico superior – PCS - do bagaço seco.

A seguir são apresentadas as metodologias de determinação do poder calorífico inferior – PCI para o bagaço seco e o bagaço contendo umidade, conforme Condições 1 e 2 mencionadas anteriormente.

4.7.1.1 – Determinação do PCI – base seca

Conforme mencionado anteriormente, os resultados obtidos para a energia bruta do *bagaço seco* correspondem ao poder calorífico superior – PCS - do bagaço seco.

Visando a transformação dos valores obtidos para o PCS em PCI, foi empregada a equação descrita por Paoliello (2006), que relaciona diretamente estes 2 parâmetros, especificamente para o *bagaço seco*.

Equação inicial:

$$PCI = PCS - 600 E_{PV} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde:

E_{PV} = massa do vapor de água presente nos gases provenientes da combustão de 1 kg do combustível, calculado em kg.

Considerando-se que a massa de água formada é equivalente a 9 vezes à massa de hidrogênio, e que para um combustível seco a água presente se deve apenas à água formada no processo de combustão, e não à água presente como umidade, tem-se que:

$$E_{PV} = 9 H \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde:

H = massa de hidrogênio entrando na composição de 1 kg do combustível

Então:

$$PCI = PCS - 5.400 H \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Onde:

H = massa de hidrogênio entrando na composição de 1 kg do combustível

Segundo Paoliello (2006), pode-se admitir que o bagaço seco contém um teor médio de hidrogênio da ordem de 6,5%. Desta forma, utilizando-se esta informação na equação 4.7, obtém-se a equação final para determinação do PCI:

$$PCI = PCS - (0,065 * 5.400) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

4.7.1.2 – Determinação do PCI – base úmida

A determinação do PCI para o bagaço úmido foi feita de acordo com Cortez et al. (2008), que apresentam um modelo para a conversão do PCS (base seca) para o PCI (base de trabalho). A saber:

$$PCI_t = [(PCS_s - \lambda.(r+0,09.H_s)).(100-W_t)/100] \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde:

PCI_t = poder calorífico inferior, base de trabalho;

PCS_s = poder calorífico superior, base seca;

λ = calor latente da água (2,31 MJ/kg a 25 °C);

$r = W_t / (100 - W_t)$;

W_t = umidade na base de trabalho;

H_s = % de hidrogênio, base seca.

A equação 4.7 foi utilizada para o cálculo do PCI do bagaço com 50% e 60% de umidade.

O percentual de hidrogênio, em base seca, foi considerado aquele definido por Paoliello (2006), podendo-se admitir que o bagaço seco contém um teor médio de hidrogênio da ordem de 6,5%.

4.7.2 – Biogás produzido na planta piloto: estimativa do poder calorífico inferior – PCI

A determinação do poder calorífico inferior – PCI do biogás produzido na planta piloto foi feita em função do valor do PCI do metano puro, considerando-se o volume de metano acumulado em cada ciclo de processo.

Desta forma, ao final de cada ciclo de processo, foi determinado o volume total de metano acumulado (Nm³ metano / kg bagaço seco processado). Com base nesta produção total de metano por ciclo, e utilizando-se o valor do PCI do metano (kcal / Nm³), foi calculado o poder calorífico por ciclo de processo (kcal / kg bagaço seco processado). Observa-se que no caso dos cálculos para o bagaço em base úmida, o volume acumulado de metano foi considerado em função da massa úmida do bagaço (Nm³ metano / kg bagaço úmido processado).

O poder calorífico do metano puro foi determinado através de literatura, sendo considerado o valor de 8900 kcal/m³ (EPA, 2009). Este valor foi convertido para as condições normais de temperatura e pressão.

4.7.3 – Balanço energético final

De posse dos resultados e valores obtidos para o PCI do bagaço inicial e final nas condições 1 e 2 (base seca e úmida), bem como o poder calorífico do biogás produzido (considerado como

o poder calorífico do metano acumulado), em cada ciclo de processo, foram feitos os cálculos de geração potencial de energia (kcal) por tonelada de bagaço de cana-de-açúcar, segundo cada uma das rotas consideradas.

Observa-se ainda que, adicionalmente, complementando o balanço energético em ambas as condições, foi feito também o cálculo de geração potencial de energia em termos de “kcal” disponível total, multiplicando-se a massa de bagaço de cana inicial e final, respectivamente. Neste caso, o conteúdo energético inicial corresponde ao PCI do bagaço inicial (kcal total), e o conteúdo energético final corresponde ao somatório do PCI do bagaço final e do biogás produzido (kcal total). Para o PCI do bagaço, este sempre é multiplicado pela massa inicial ou final de bagaço nos tanques de hidrólise (base seca ou úmida, dependendo da situação). Já o PCI do biogás é multiplicado pela massa de bagaço inicial (base seca ou úmida), uma vez que sua geração ocorre em função do bagaço armazenado inicialmente nos tanques de hidrólise.

A saber:

- Condição 1: Bagaço de cana em base seca
 - Balanço energético da Rota 1: calculado a partir do PCI do bagaço de cana “inicial” (gerado diretamente na Usina), em base seca;
 - Balanço energético da Rota 2: calculado a partir do somatório do PCI do bagaço de cana “final” (após processamento na planta piloto), em base seca, e do PCI do biogás (metano acumulado) produzido em cada ciclo de processo.
- Condição 2: Bagaço de cana em base úmida
 - Balanço energético da Rota 1: calculado a partir do PCI do bagaço de cana “inicial” (gerado diretamente na Usina), em base úmida;
 - Balanço energético da Rota 2: calculado a partir do somatório do PCI do bagaço de cana “final” (após processamento na planta piloto), em base úmida, e do PCI do biogás (metano acumulado) produzido em cada ciclo de processo.

Para cada ciclo, foi feita uma comparação entre os balanços energéticos das rotas 1 e 2, em cada condição considerada (bagaço em base seca e base úmida). Em ambas as “condições” consideradas, a Rota 1 foi aquela correspondente a cada variedade do bagaço de cana coletado

na Usina, ou seja, para cada ciclo de processo, o cálculo do balanço energético da Rota 1 foi feito a partir do PCI do bagaço “inicial”, considerando-se cada variedade de cana coletada.

Inicialmente foi calculado o balanço energético para cada ciclo de processo, sendo feitas as considerações pertinentes. Posteriormente, foi feita uma avaliação conjunta qualitativa e quantitativa deste balanço para todos os ciclos.

Posteriormente, foi feita uma avaliação semelhante para os ciclos correspondentes a cada variedade de cana processada: foram agrupados os ciclos referentes ao bagaço novo de cada variedade processada. Foram feitos cálculos de estatística básica – média e desvio padrão – para cada situação.

Posteriormente à avaliação do balanço energético segundo cada variedade, foi feita uma avaliação geral de todos os ciclos válidos, com cálculos de estatística básica para todos os dados em conjunto. Não foi considerado nos cálculos o gasto energético das instalações de geração de biogás e queima do bagaço.

4.8. Tabela síntese das atividades operacionais relacionadas à planta piloto

A tabela 4.3 apresenta um resumo das principais metodologias e análises realizadas, para cada fase da operação da planta piloto: partida inicial, testes de comissionamento e operação plena.

Tabela 4.3 – Síntese das atividades operacionais por fase de operação da planta piloto

Fase de operação	Substrato	Adição de nutrientes na água nova	Taxas de circulação de solução	Medições de acompanhamento operacional	Análises físico-químicas no bagaço inicial e final, e biogás
Partida inicial	Bagaço de cana-de-açúcar	Não	- 1º estágio: 100 L por kg MOS por dia; - 2º estágio: Aumento gradual, até 7 L por kg MOS por dia	- Medições diárias: pH, volume acumulado de biogás, percentual de gases no biogás - Medição periódica: teor de gases no biogás (cromatografia gasosa), no período final do ciclo	- Bagaço: MOS
Testes de comissionamento	Restos de verduras, frutas e legumes (CEASA)	Não	- 1º estágio: 100 L por kg MOS por dia; - 2º estágio: 7 L por kg MOS por dia	- Medições periódicas (não diárias): pH, volume acumulado de biogás, percentual de gases no biogás	-
Operação de rotina **	Bagaço de cana-de-açúcar	Sim	- 1º estágio: 100 L por kg MOS por dia; - 2º estágio: inicialmente 7 L por kg MOS por dia, havendo redução para 2 L por kg MOS por dia, a partir do 3º ciclo	- Medições diárias: pH, DQO, volume acumulado de biogás, percentual de gases no biogás; - Medições periódicas: análise de nutrientes na solução circulante	- Bagaço: Composição imediata, MOS, composição básica, energia bruta e PCI (base seca e úmida); - Biogás: PCI (base seca e úmida)

** Incluindo, também, o ciclo de transição entre os testes de comissionamento e a operação definitiva com o bagaço.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a presente pesquisa são apresentados em 02 (duas) etapas distintas, a saber:

- ETAPA 1: Resultados operacionais da planta piloto - protocolos de funcionamento, rendimento e produção de biogás;
- ETAPA 2: Balanço energético das rotas 1 e 2 – rotas tradicional e alternativa para produção de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

5.1 - Resultados operacionais da planta piloto - protocolos de funcionamento, rendimento e produção de biogás

O presente item apresenta os resultados operacionais obtidos a partir do funcionamento da planta piloto, para biodigestão anaeróbia do bagaço de cana-de-açúcar.

Considerando-se o intervalo de tempo em que o aparato experimental foi mantido em operação - tempo total de 08 (oito) meses, foram realizados 11 ciclos operacionais, sendo que destes, 01 ciclo foi considerado como de “transição” entre os testes de comissionamento e a operação da planta piloto, 08 ciclos foram considerados válidos e 02 inválidos.

Os ciclos inválidos foram assim considerados pelo fato de terem apresentado uma redução significativa e repentina de pH, a níveis inferiores ao recomendado, no tanque de estocagem (precedente do reator anaeróbio), indicando uma possível letalidade aos microrganismos envolvidos na formação de metano. Os ciclos inválidos acarretaram na necessidade de realização de 02 (duas) reinoculações extras do reator anaeróbio. As reinoculações foram realizadas em um intervalo de tempo de aproximadamente 01 mês, cada uma.

A tabela 5.1 relaciona as variedades de cana-de-açúcar, as quais deram origem às amostras de bagaço coletado e processado; os respectivos ciclos de processo e a identificação dos ciclos válidos e inválidos.

Tabela 5.1 – Relação de variedades da cana-de-açúcar, amostras de bagaço coletadas para processamento na planta piloto, e ciclos de processo

Identificação do bagaço de cana	Variedade de cana-de-açúcar	Data da coleta	Ciclos operacionais realizados
Bagaço Novo 1	RB 855536	11/08/2009	Ciclo de transição, Ciclos válidos 01 e 02
Bagaço Novo 1b ⁽¹⁾	RB 72454	05/10/2009	Ciclos inválidos 01 e 02, ciclos após reinoculação
Bagaço Novo 2	SP 801816	28/11/2009	Ciclos válidos 03, 04, 05 e 06
Bagaço Novo 3	RB 855536	15/12/2009	Ciclos válidos 07 e 08

(1) Esta amostra de bagaço foi utilizada somente em ciclos considerados como inválidos, e /ou ciclos logo após os procedimentos de reinoculação.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os ciclos de processo efetuados. Uma ênfase é dada nos ciclos considerados como válidos.

5.1.1 - Ciclo de Transição

O ciclo de transição foi considerado o primeiro ciclo operacional utilizando bagaço de cana-de-açúcar, após o período de testes de comissionamento.

Como os substratos utilizados nestes testes possuíam elevada biodegradabilidade (resíduos de frutas, legumes e verduras), as soluções de circulação no aparato experimental se apresentavam mais enriquecidas com compostos orgânicos biodegradáveis, o que também proporcionava uma produção mais elevada de biogás, contendo um percentual de metano também mais elevado.

Esta solução circulante, mais enriquecida com materiais orgânicos, foi aproveitada para o processamento da primeira carga de bagaço de cana. Mesmo com a complementação de água nova no processo, o efeito da presença dos compostos biodegradáveis foi verificado nos resultados deste primeiro ciclo. Devido a esta interferência, o ciclo operacional inicial foi considerado como de transição, e seus resultados não foram considerados para o cálculo do balanço energético final. Ou seja, este ciclo não foi considerado como “válido”.

A título de caracterização do ciclo de transição, a seguir são apresentadas algumas considerações sucintas sobre o processo operacional ocorrido e alguns resultados obtidos.

Resultados obtidos

Por ser considerado como transição entre os testes de comissionamento e a operação normal da planta piloto, e não como um ciclo válido, optou-se pela verificação e controle diário dos parâmetros mais essenciais para a operação da planta piloto, tais como: percentual de metano, volume de biogás acumulado, e pH. Não foi analisado o parâmetro DQO.

O teste de determinação da matéria orgânica seca – MOS – foi realizado, visando à determinação das taxas de circulação da solução nos estágios 1 e 2. No entanto, não foi considerada necessária a determinação de parâmetros operacionais em função da MOS (volume acumulado de biogás e de metano, dentre outros). As interferências dos ciclos anteriores influenciariam na análise dos resultados obtidos.

O bagaço de cana após o processamento também não foi analisado. Estas análises foram feitas somente para os ciclos de processo considerados como válidos.

Tabela 5.2 – Dados iniciais do bagaço de cana para determinação das taxas de circulação de solução na planta piloto – ciclo de transição

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise	Taxas de circulação de solução
Bagaço Novo 1	53,2	0,92 (0,07)	45,9	- Massa total: 30,5 kg - MOS: 14 kg	- Estágio 1: 100 L * kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 7 L * kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ .

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata
Valor (desvio padrão)

Conforme já mencionado, todos os ciclos de processo realizados a partir do ciclo de transição (inclusive), foram iniciados com a disposição de uma nova carga de bagaço de cana-de-açúcar nos tanques de hidrólise, e a complementação de solução nova (água nova e biofertilizante, na proporção sugerida) no tanque pulmão, até uma altura equivalente de 2/3 do tanque.

A composição da solução nova, segundo os parâmetros nitrogênio, fosfato e sulfato, na forma total (que neste caso coincide com a forma solúvel), é apresentada a seguir:

Tabela 5.3 – Características da solução nova adicionada na planta piloto (água nova + biofertilizante)

Solução nova (água e biofertilizante)	Nitrogênio (mg/L)	Fosfato (mg/L)	Sulfato (mg/L)
	86,14 ⁽¹⁾ (0,89)	65,40 ⁽²⁾ (0,92)	90,05 ⁽²⁾ (0,76)

Parâmetros analisados em sua forma total (nesta solução, as concentrações totais são iguais às concentrações solúveis)

(1) Valor médio dos resultados obtidos para 03 amostras coletadas da solução

(2) Valor médio dos resultados obtidos para 03 amostras coletadas da solução, cada qual analisada em duplicata (total de 6 resultados)

Valor (desvio padrão)

Tabela 5.4 – Medições diárias realizadas na planta piloto – ciclo de transição

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (%) no biogás	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese
1	0,094	0,094	0,007	73,8	0,035	0,035	0,002	6,51	6,89
2	0,108	0,014	0,008	78,3	0,011	0,045	0,003	6,67	6,96
3	0,130	0,022	0,009	81,7	0,018	0,063	0,005	7,01	7,13
4	0,151	0,021	0,011	84,1	0,018	0,081	0,006	7,22	7,33
5	0,161	0,010	0,012	83,5	0,008	0,089	0,006	7,36	7,47
6	0,172	0,011	0,012	77,4	0,009	0,098	0,007	7,37	7,52
7	0,175	0,003	0,013	74,7	0,003	0,100	0,007	7,41	7,65

Destaca-se que a produção de metano (CH₄) diária e acumulada foram calculadas através da integração numérica da curva “Percentual de metano diário X Volume de biogás acumulado”.

A seguir são apresentados gráficos da produção acumulada de biogás e produção acumulada de metano, por quilograma de MOS processada.

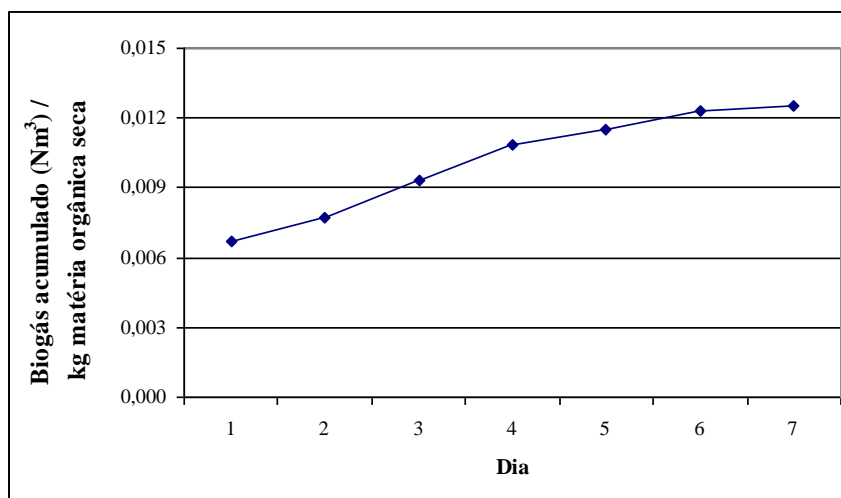


Figura 5.1 – Volume de biogás acumulado por quilograma de matéria orgânica seca

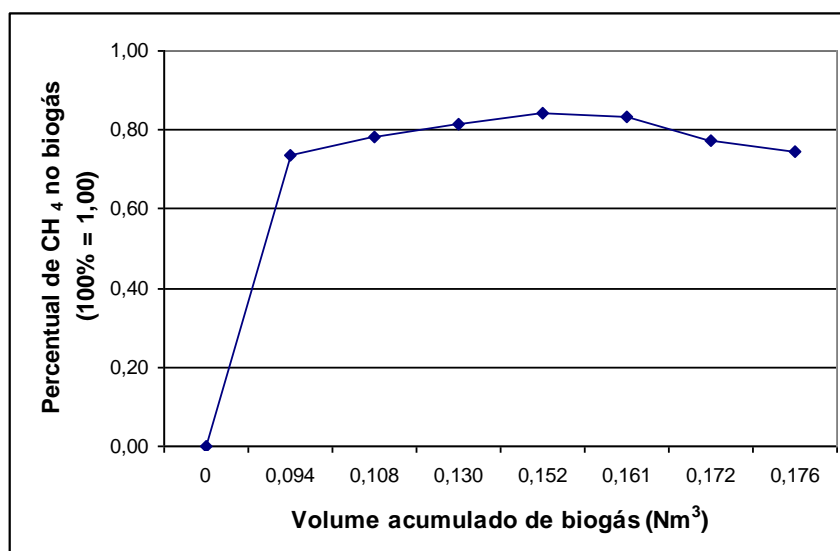


Figura 5.2 – Percentual de metano diário em função do volume de biogás acumulado

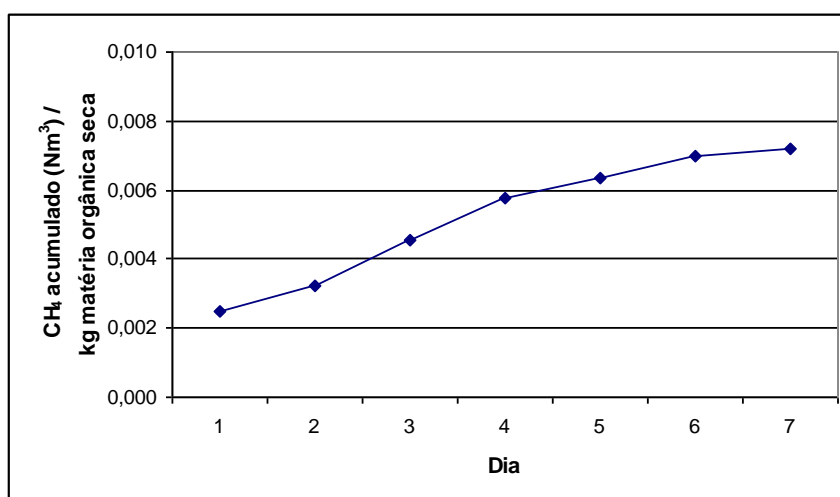


Figura 5.3 – Volume de metano acumulado por quilograma de matéria orgânica seca

O ciclo de transição pode ser considerado como um ciclo atípico para o bagaço de cana. Durante todo o processo, o percentual de metano se manteve em níveis bastante elevados – entre 73,8 e 84,1%. No entanto, foi verificada uma redução mais brusca no volume de biogás gerado diariamente, o que fez com que a produção do gás metano propriamente dito também apresentasse uma forte redução, justificando então a finalização do ciclo.

Observou-se uma constância dos valores de pH, em conformidade à magnitude esperada, embora parte dos valores não esteja totalmente dentro das faixas “ótimas”, constantes na tabela 3.5.

Em relação à produção de biogás e produção de metano por quilograma de MOS processada, ao final do ciclo de transição foram obtidos, respectivamente, 0,013 e 0,007 Nm³/kg MOS.

Uma avaliação mais detalhada do processo foi feita nos ciclos considerados como válidos.

5.1.2 - Ciclos Válidos – avaliação individual dos ciclos

Conforme já mencionado, todos os ciclos de processo foram iniciados com a disposição de uma nova carga de bagaço de cana-de-açúcar nos tanques de hidrólise, e a complementação de solução nova (água nova e biofertilizante).

A composição da solução nova, segundo os parâmetros nitrogênio, fosfato e sulfato, na forma total (que neste caso coincide com a forma solúvel), corresponde à mesma já apresentada na tabela 5.3.

Durante o processo de biodigestão na planta piloto, o bagaço processado retém uma quantidade significativa de solução circulante. Esta retenção de líquido, somada às perdas de processo e também à coleta de amostras, faz com que, ao início de cada ciclo de processo, haja a necessidade de complementação da solução circulante.

As figuras a seguir apresentam, respectivamente, o bagaço de cana inicial e final, bem como o bagaço após a biodigestão, ainda no interior do tanque de hidrólise.



Figura 5.4 – Bagaço inicial e final



Figura 5.5 – Bagaço de cana após a biodigestão

GRÁFICOS GERAIS

Considerando-se os resultados obtidos para os ciclos válidos, são apresentadas, a seguir, as figuras 5.6 a 5.92, contendo, para cada ciclo, os gráficos de produção acumulada de biogás e produção acumulada de metano, por quilograma de MOS processada; taxa de produção de metano ao longo do tempo; evolução do percentual de gases no biogás; evolução do pH e DQO no 1º e 2º estágios; e a relação entre a produção de metano acumulado e a DQO.

Destaca-se que a produção de metano (CH_4) diária e acumulada foram calculadas através da integração numérica da curva “Percentual de metano diário X Volume de biogás acumulado”.

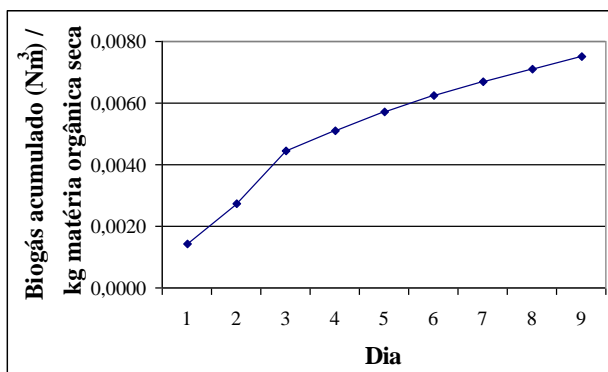


Figura 5.6 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 01

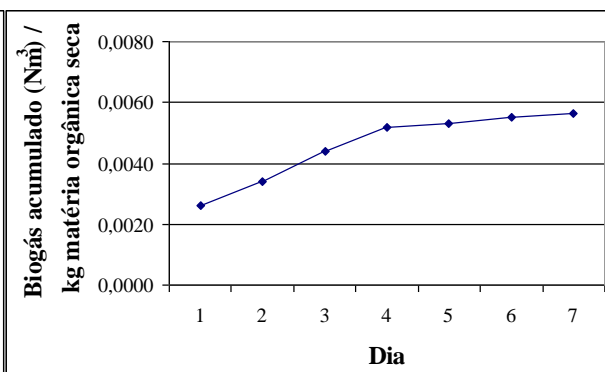


Figura 5.7 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 02

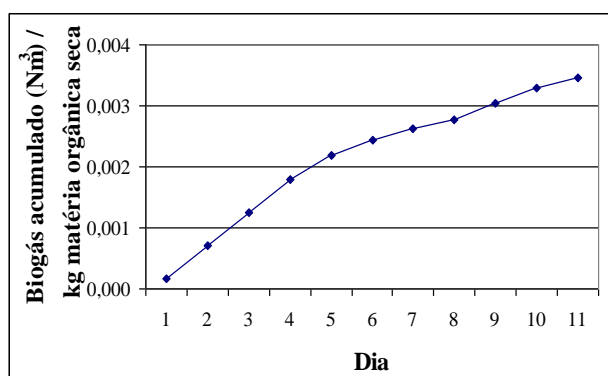


Figura 5.8 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 03

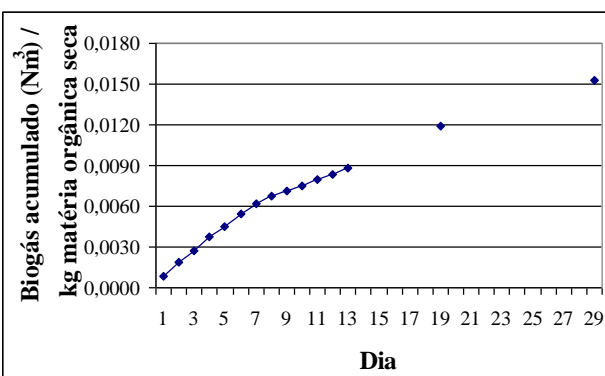


Figura 5.9 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 04

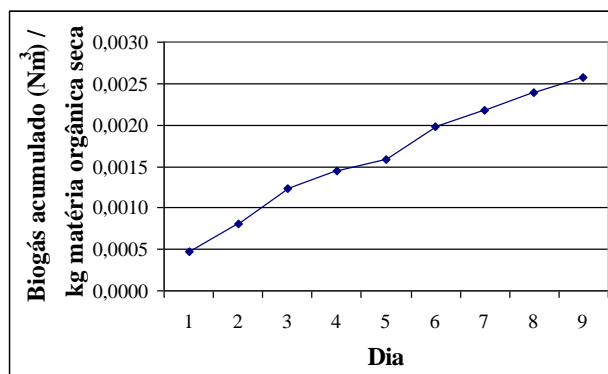


Figura 5.10 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 05

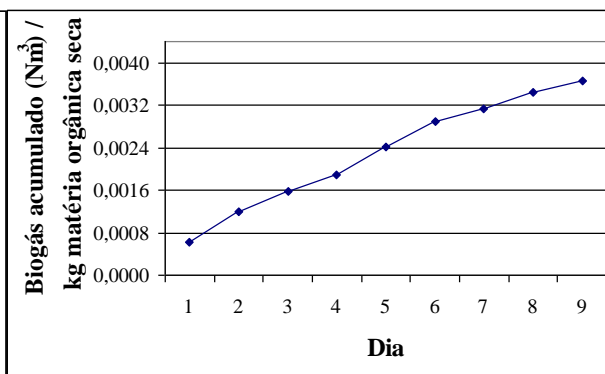


Figura 5.11 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 06

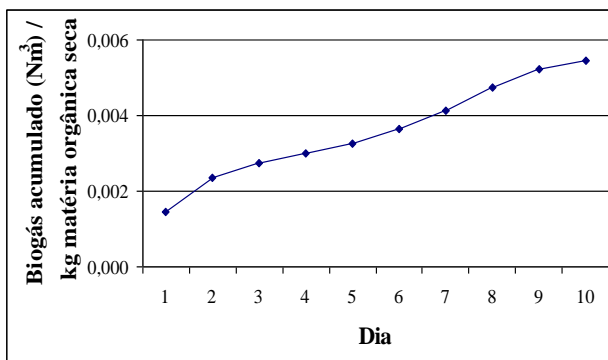


Figura 5.12 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 07

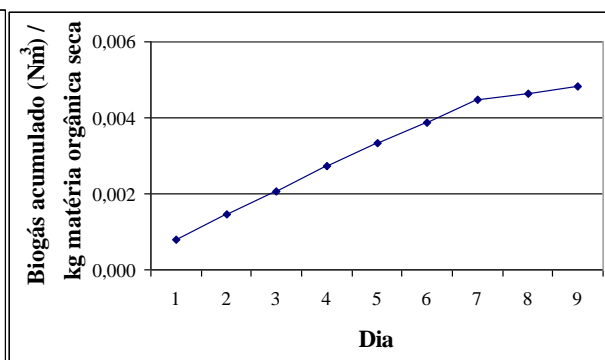


Figura 5.13 – Biogás acumulado por kg MOS
– ciclo válido 08

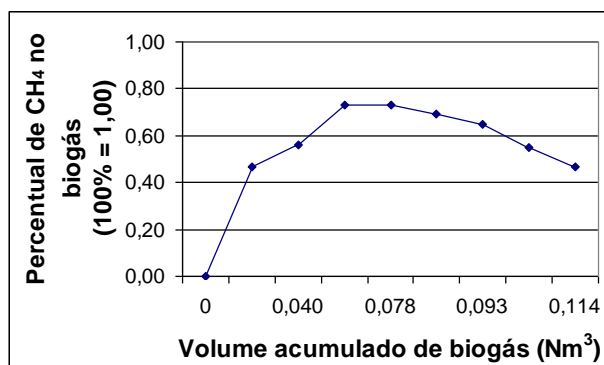


Figura 5.14 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 01

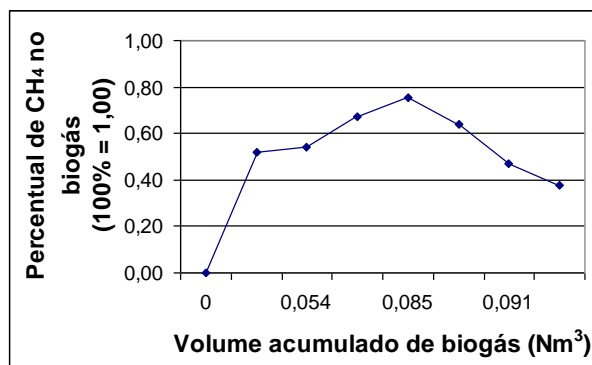


Figura 5.15 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 02

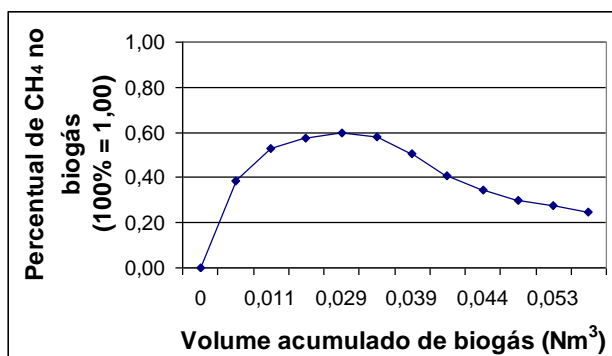


Figura 5.16 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 03

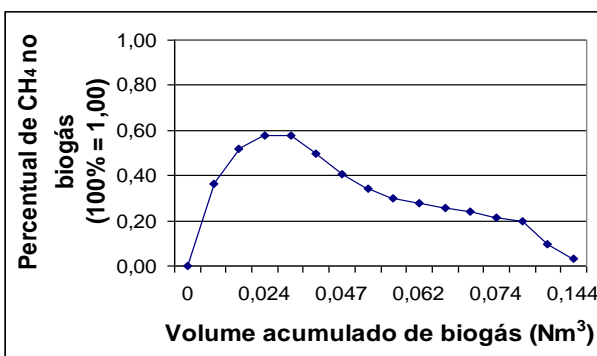


Figura 5.17 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 04

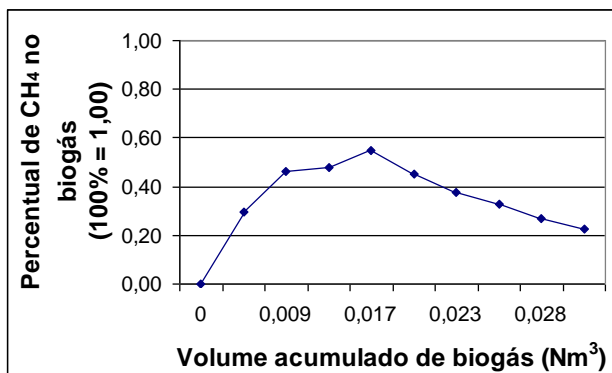


Figura 5.18 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 05

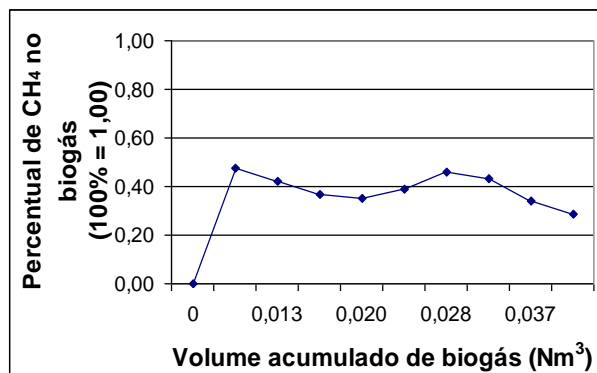


Figura 5.19 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 06

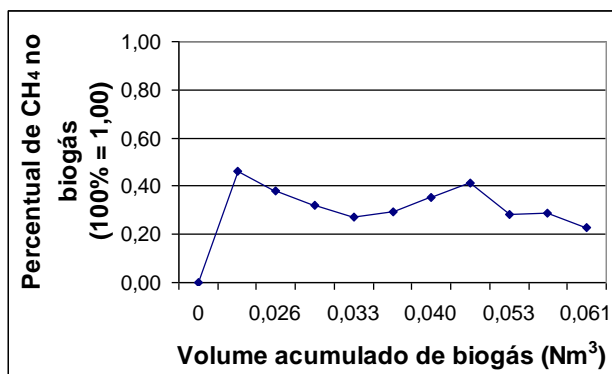


Figura 5.20 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 07

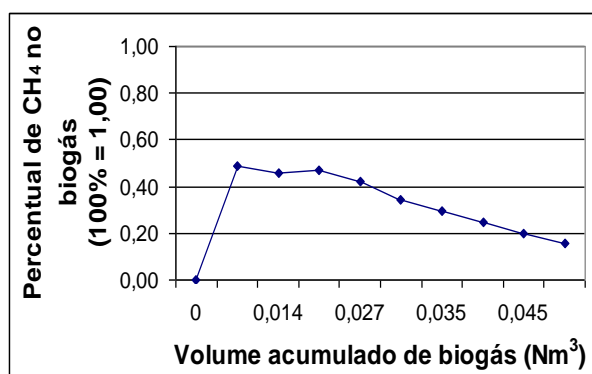


Figura 5.21 – Metano diario (%) X volumen acumulado de biogás – ciclo válido 08

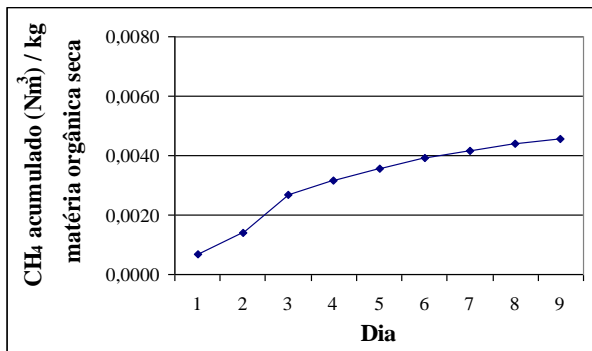


Figura 5.22 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 01

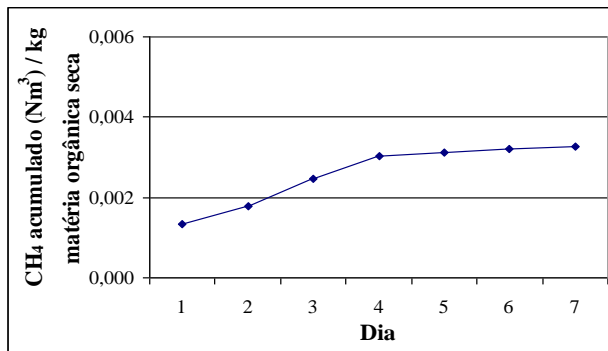


Figura 5.23 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 02

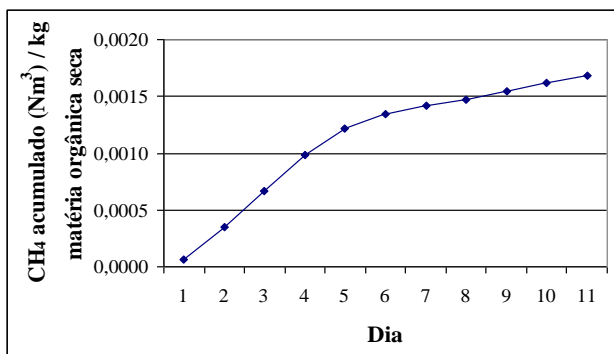


Figura 5.24 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 03

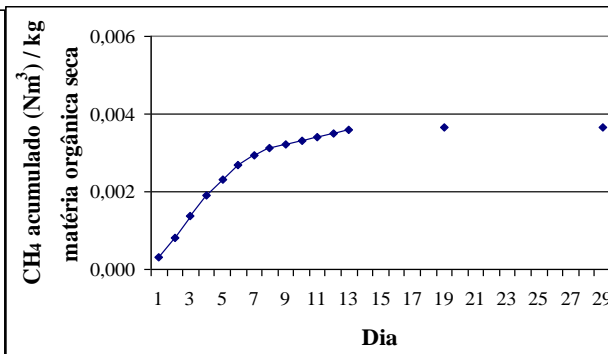


Figura 5.25 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 04

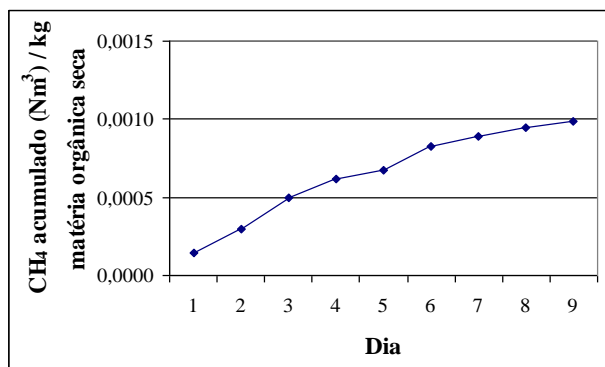


Figura 5.26 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 05

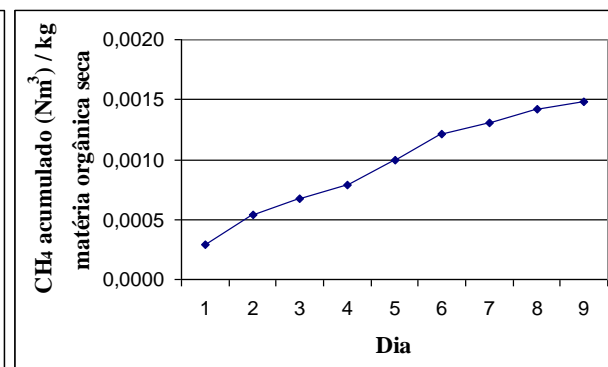


Figura 5.27 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 06

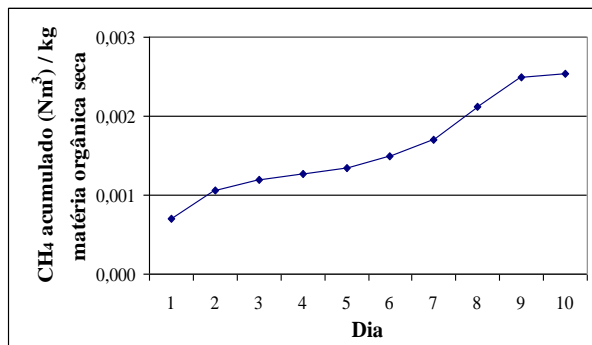


Figura 5.28 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 07

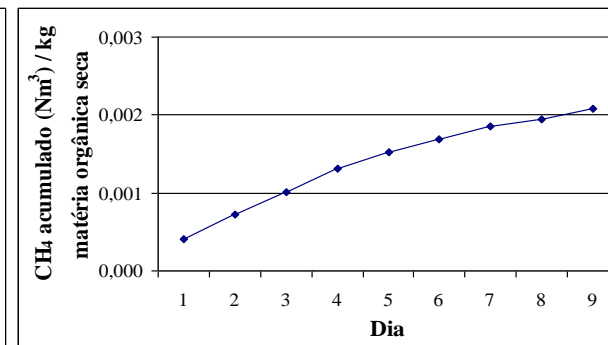


Figura 5.29 – Volume de metano acumulado por kg MOS – ciclo válido 08

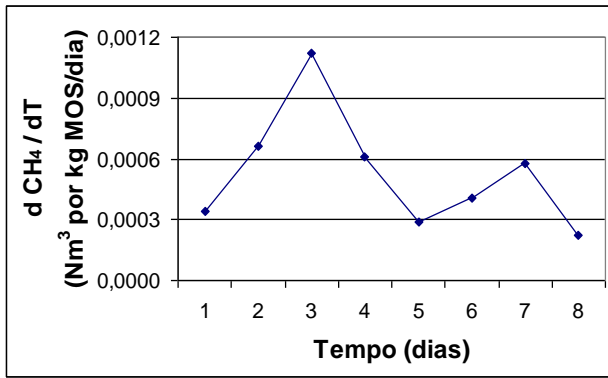


Figura 5.30 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 01

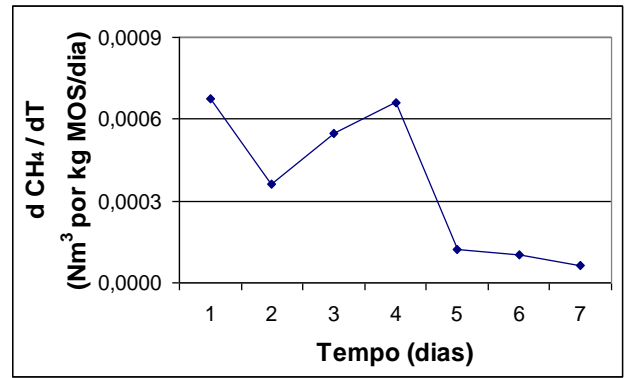


Figura 5.31 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 02

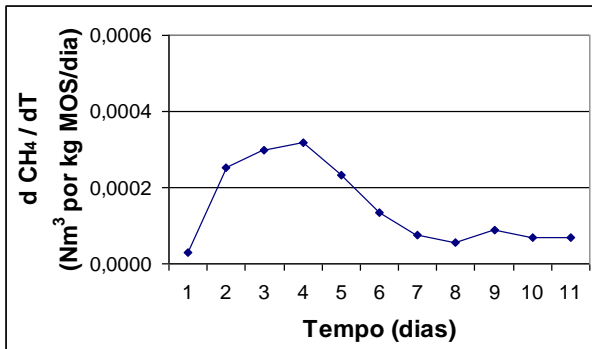


Figura 5.32 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 03

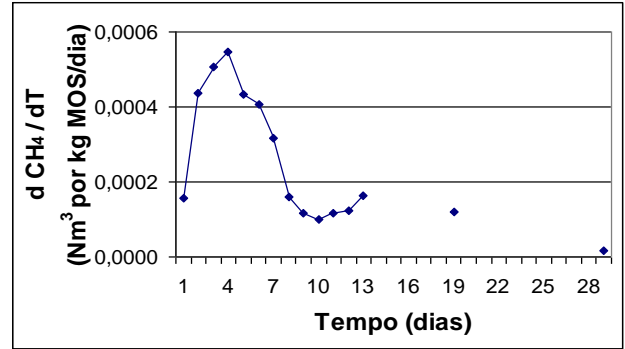


Figura 5.33 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 04

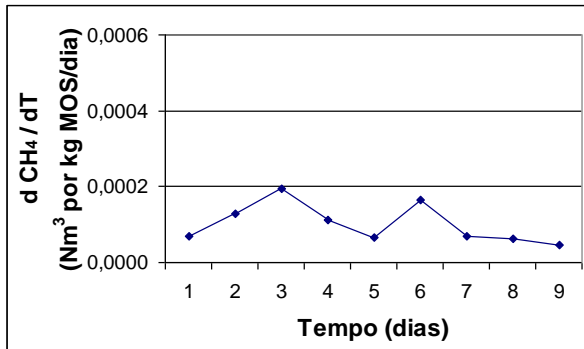


Figura 5.34 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 05

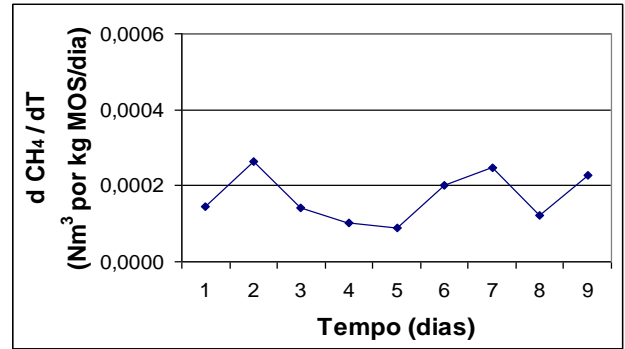


Figura 5.35 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 06

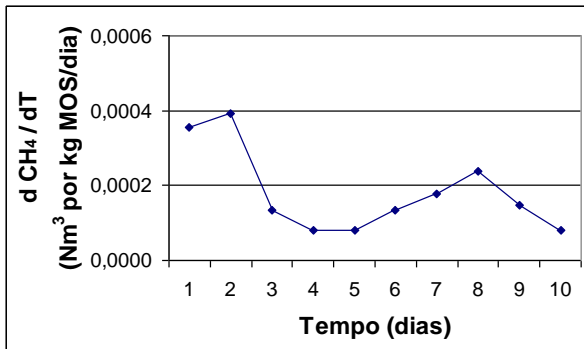


Figura 5.36 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 07

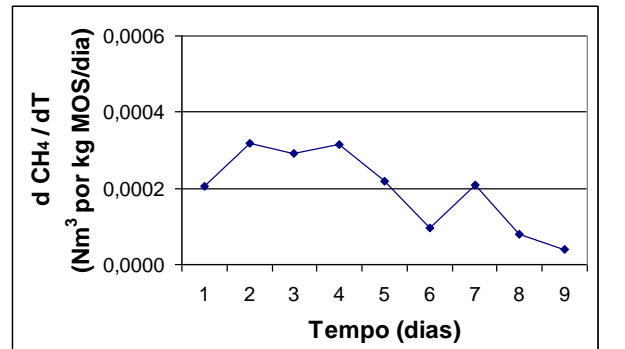


Figura 5.37 – Taxa de produção de metano ao longo do tempo – ciclo válido 08

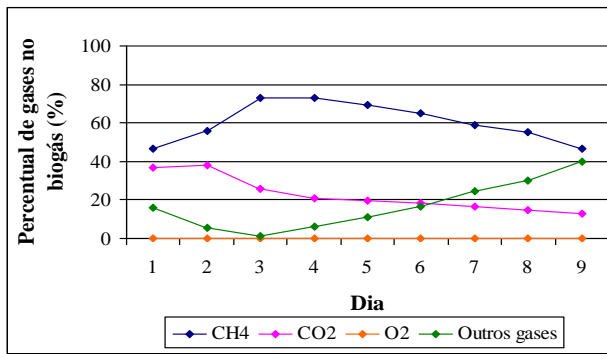


Figura 5.38 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 01

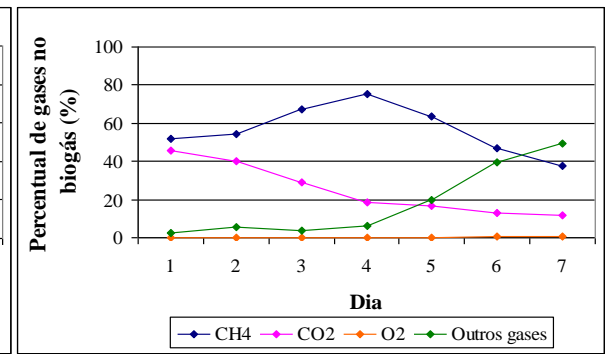


Figura 5.39 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 02

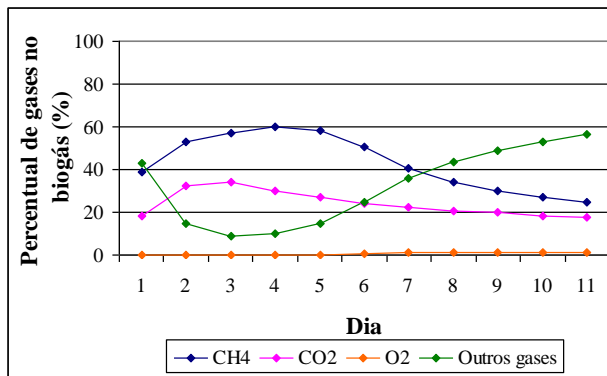


Figura 5.40 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 03

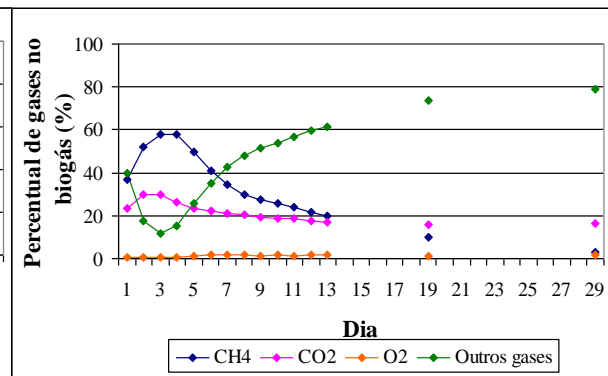


Figura 5.41 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 04

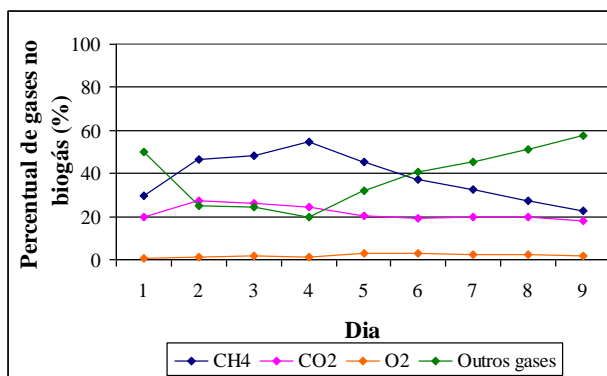


Figura 5.42 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 05

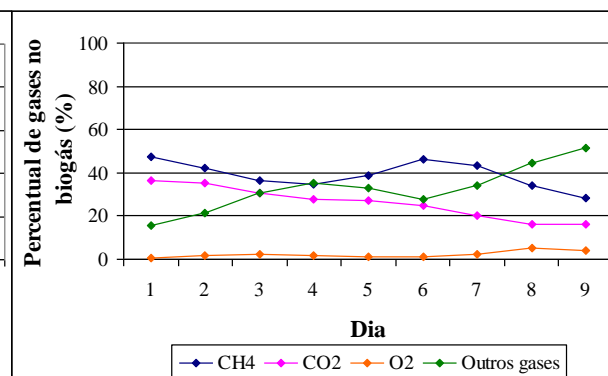


Figura 5.43 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 06

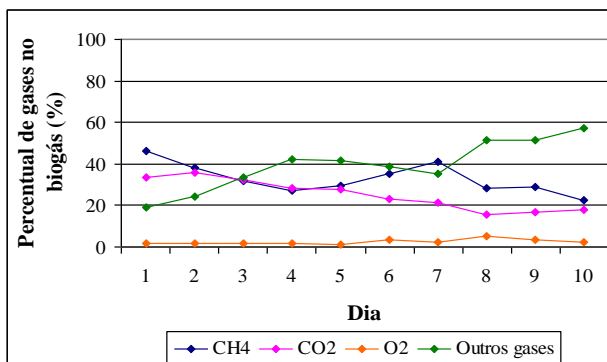


Figura 5.44 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 07

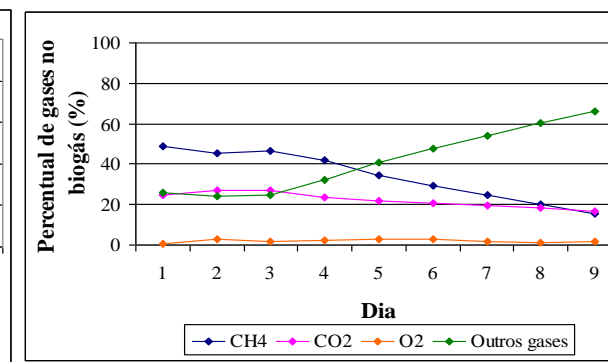


Figura 5.45 – Evolução do percentual de gases no biogás – ciclo válido 08

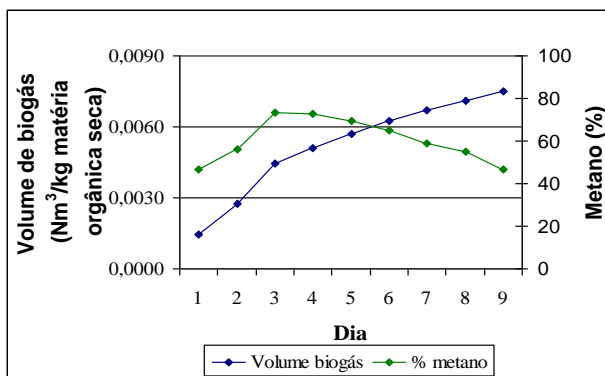


Figura 5.46 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 01

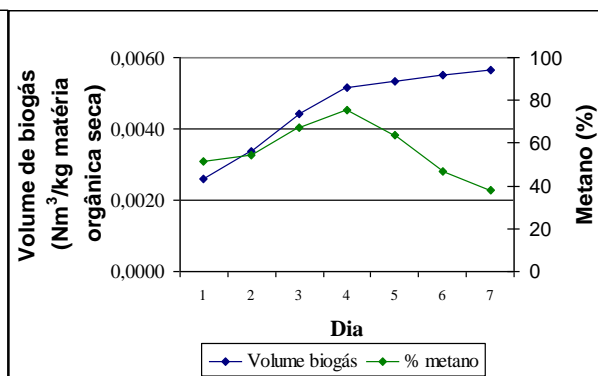


Figura 5.47 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 02

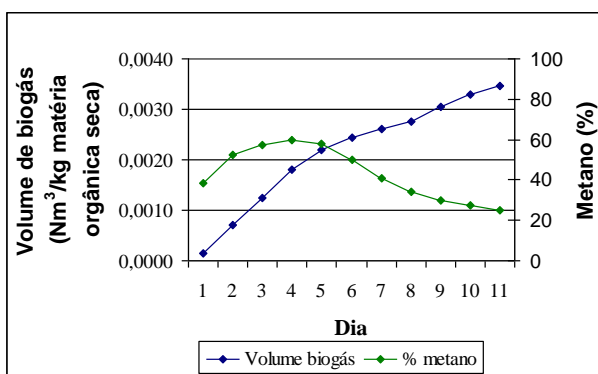


Figura 5.48 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 03

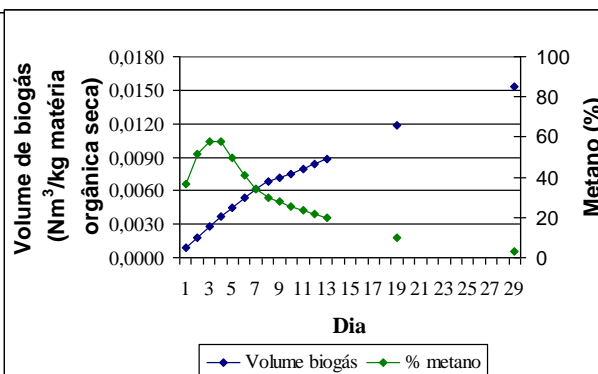


Figura 5.49 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 04

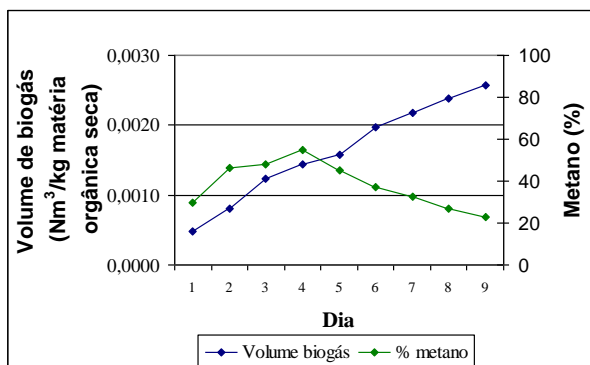


Figura 5.50 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 05

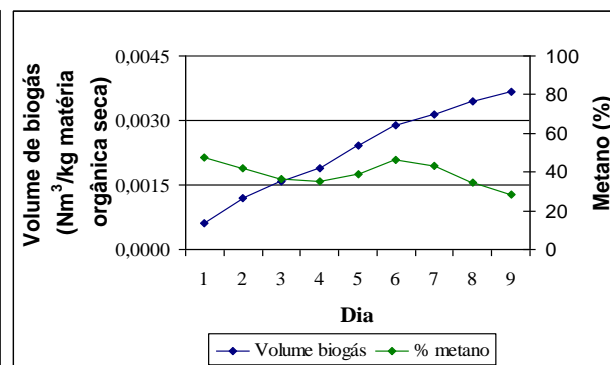


Figura 5.51 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 06

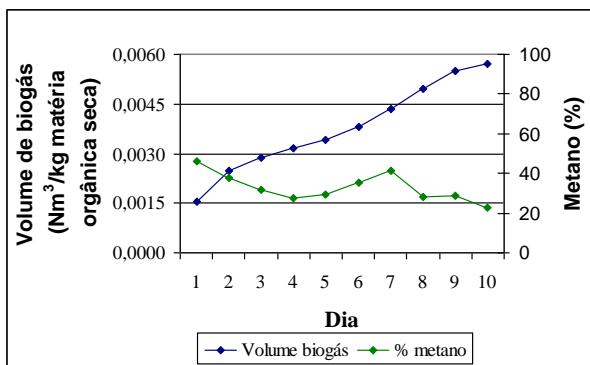


Figura 5.52 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 07

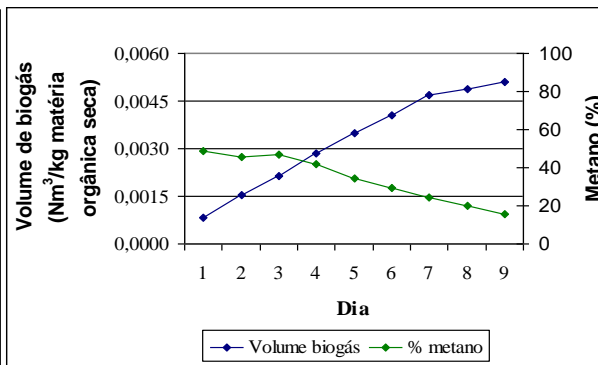


Figura 5.53 – Volume de biogás produzido e percentual de metano – ciclo válido 08

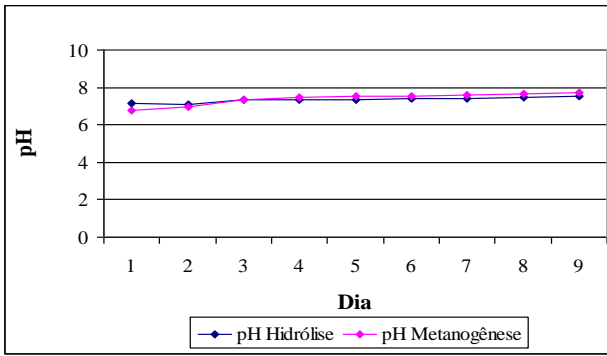


Figura 5.54 – Evolução do pH

– ciclo válido 01

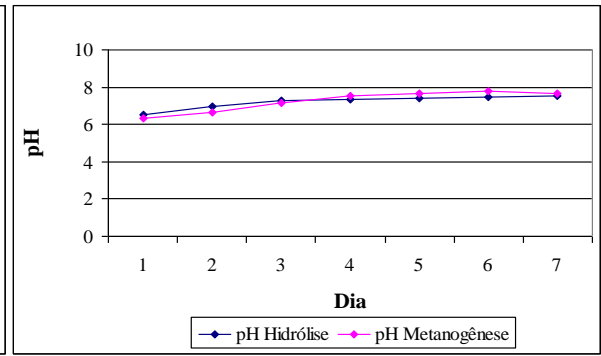


Figura 5.55 – Evolução do pH

– ciclo válido 02

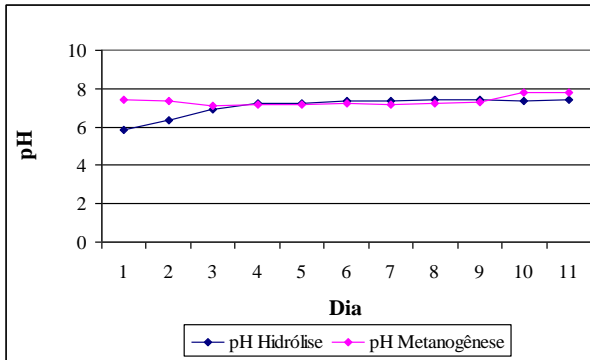


Figura 5.56 – Evolução do pH

– ciclo válido 03

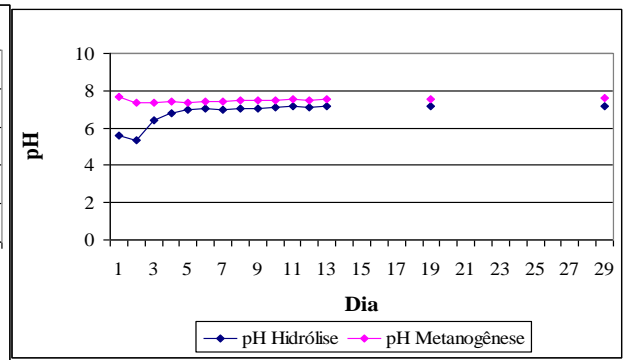


Figura 5.57 – Evolução do pH

– ciclo válido 04

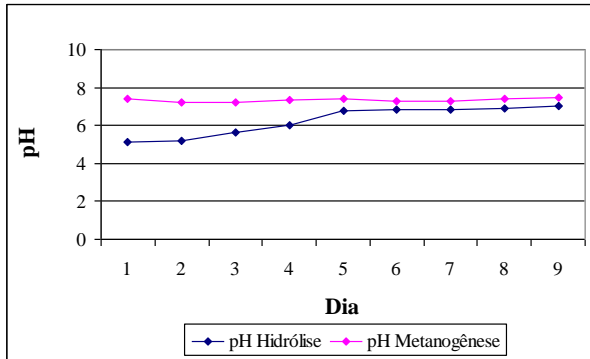


Figura 5.58 – Evolução do pH

– ciclo válido 05

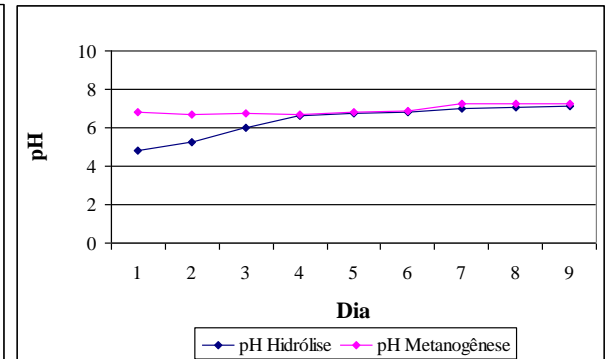


Figura 5.59 – Evolução do pH

– ciclo válido 06

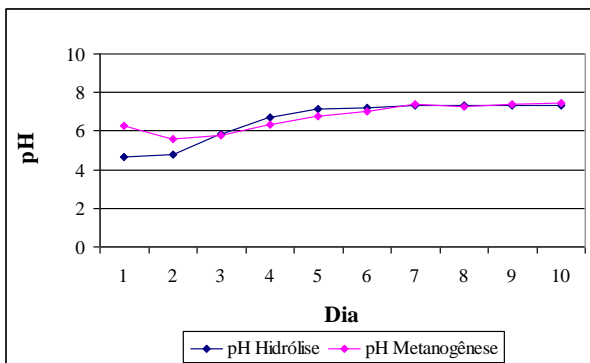


Figura 5.60 – Evolução do pH

– ciclo válido 07

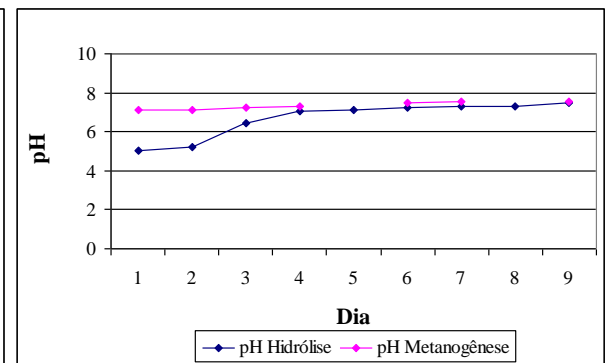


Figura 5.61 – Evolução do pH

– ciclo válido 08

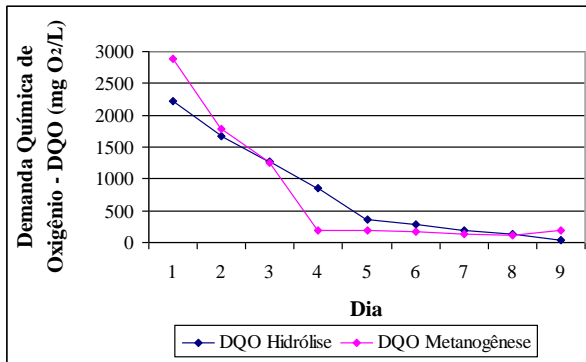


Figura 5.62 – Evolução da DQO

– ciclo válido 01

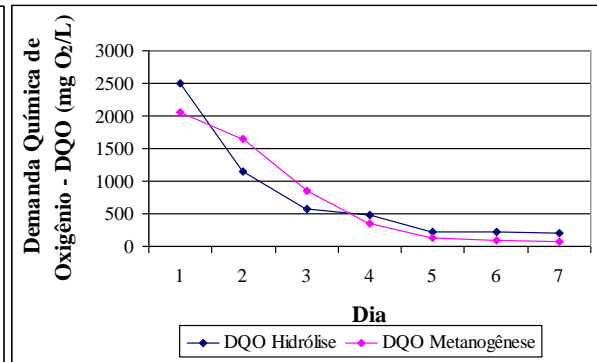


Figura 5.63 – Evolução da DQO

– ciclo válido 02

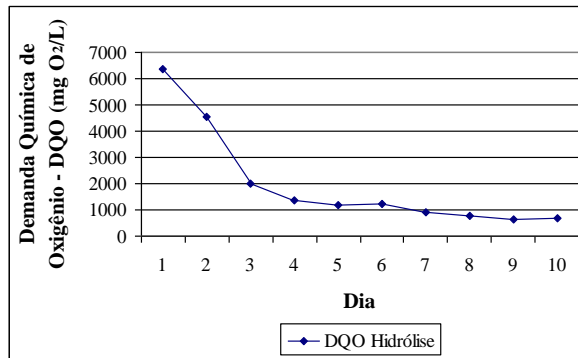


Figura 5.64 – Evolução da DQO

– ciclo válido 03

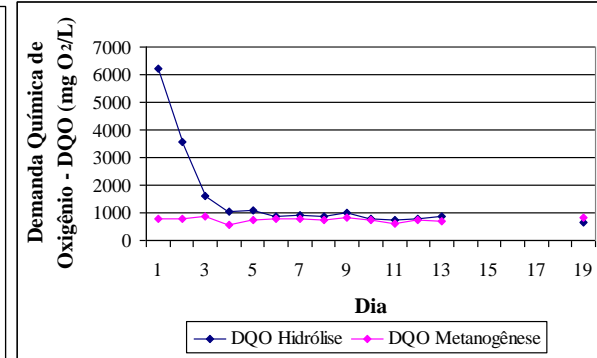


Figura 5.65 – Evolução da DQO

– ciclo válido 04

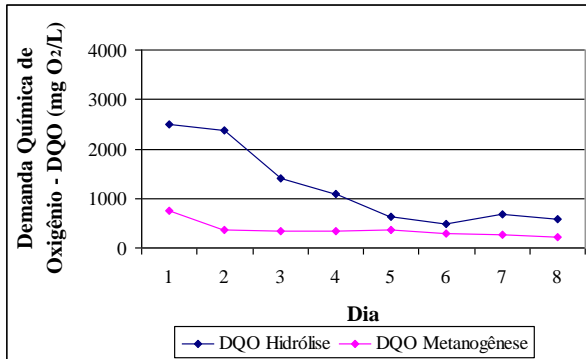


Figura 5.66 – Evolução da DQO

– ciclo válido 05

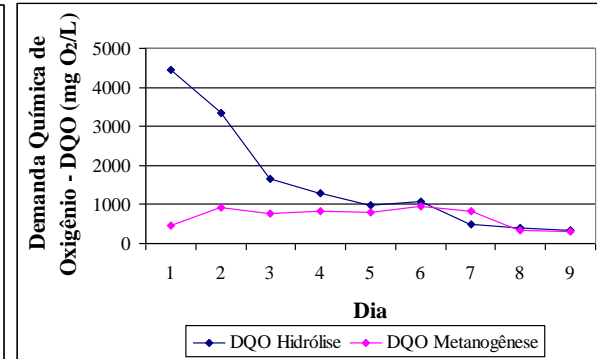


Figura 5.67 – Evolução da DQO

– ciclo válido 06

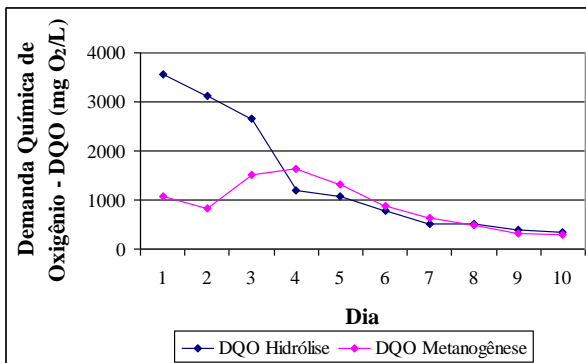


Figura 5.68 – Evolução da DQO

– ciclo válido 07

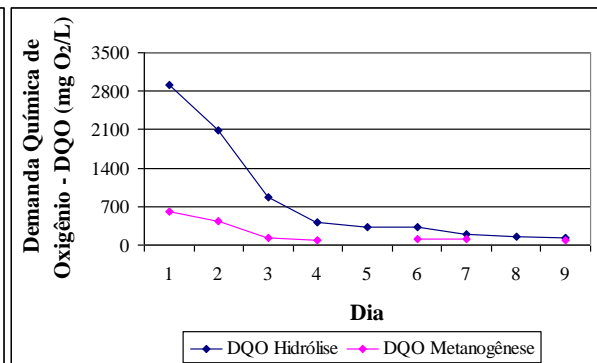


Figura 5.69 – Evolução da DQO

– ciclo válido 08

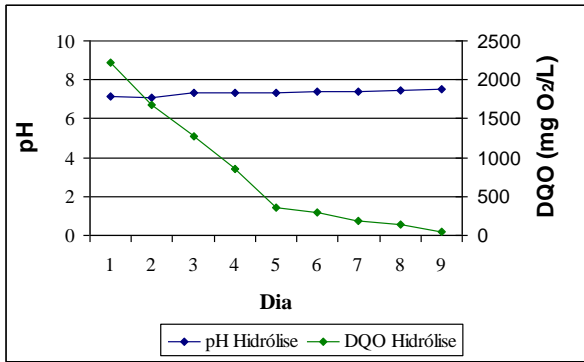


Figura 5.70 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 01

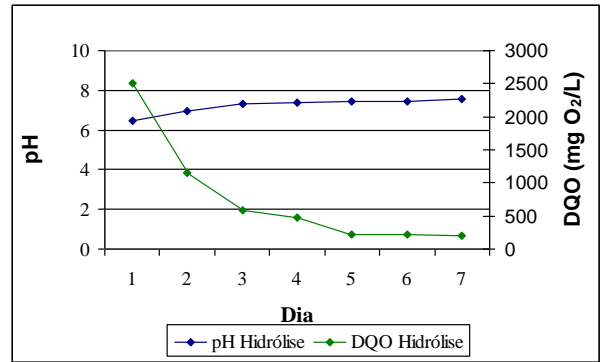


Figura 5.71 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 02

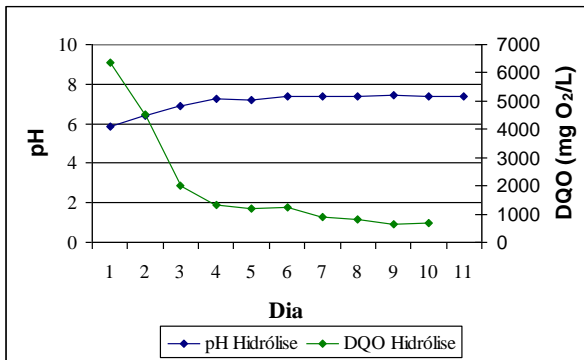


Figura 5.72 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 03

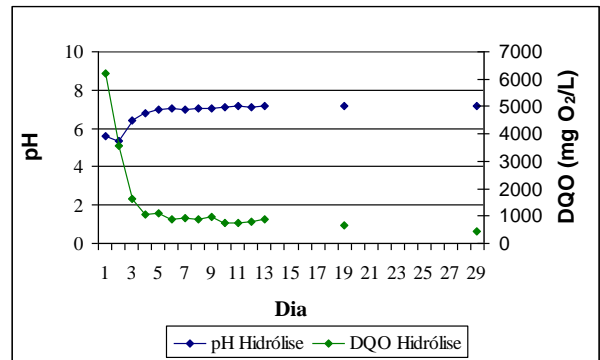


Figura 5.73 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 04

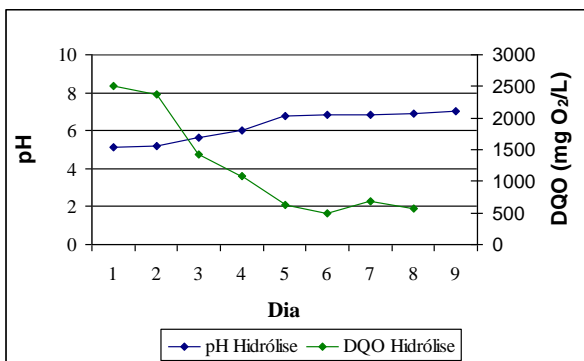


Figura 5.74 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 05

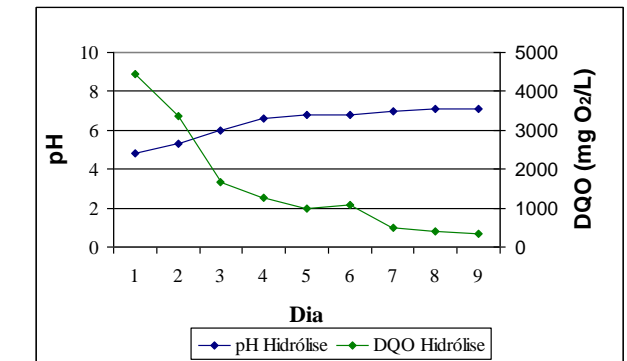


Figura 5.75 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 06

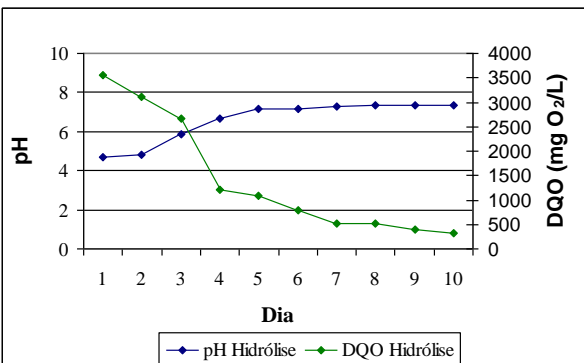


Figura 5.76 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 07

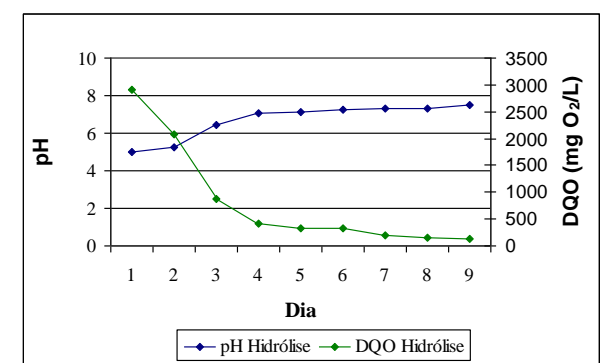


Figura 5.77 – Evolução do pH e DQO na hidrólise – ciclo válido 08

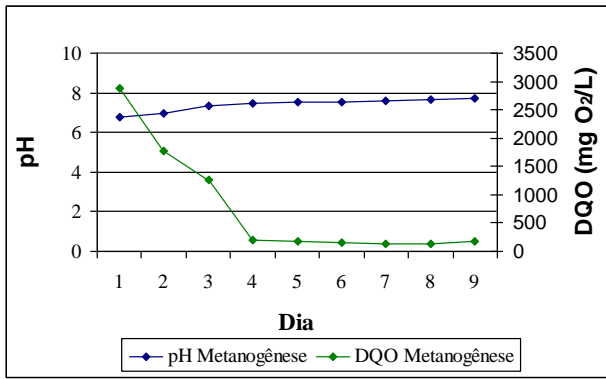


Figura 5.78 – Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 01

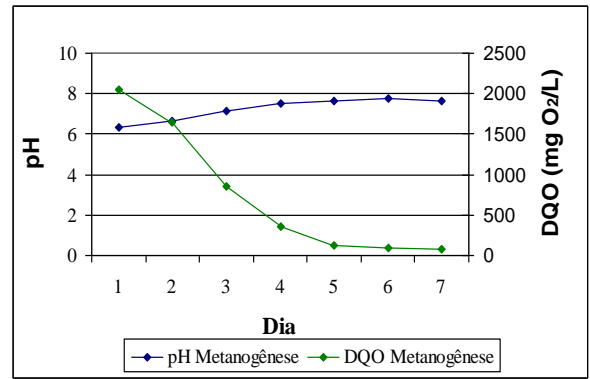


Figura 5.79 – Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 02

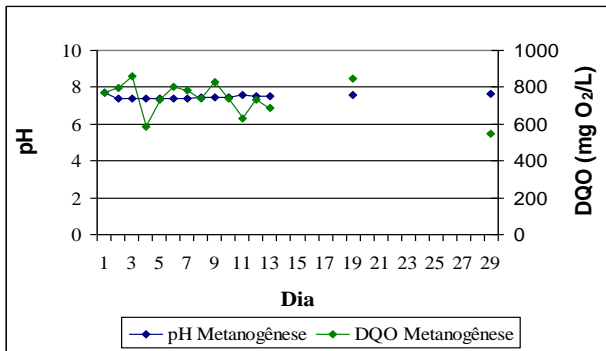


Figura 5.80 – Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 04

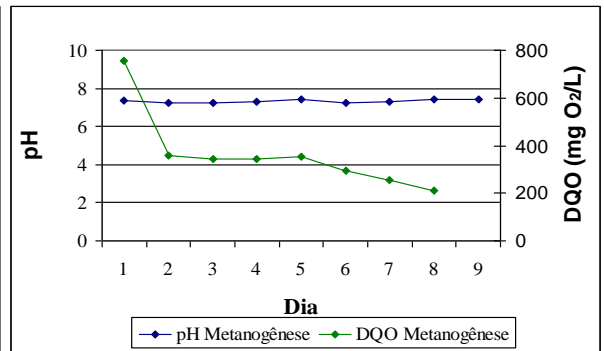


Figura 5.81 – Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 05

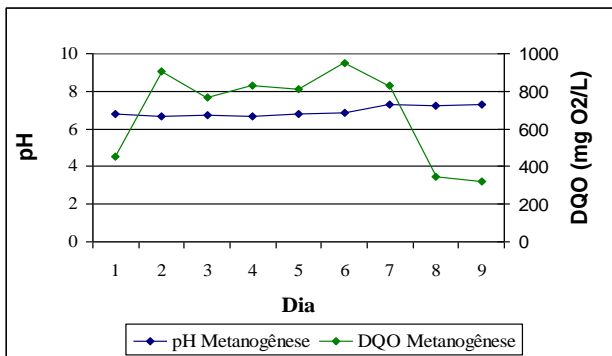


Figura 5.82 – Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 06

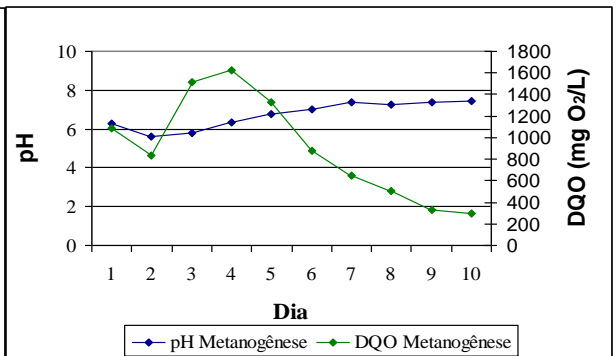


Figura 5.83 – Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 07

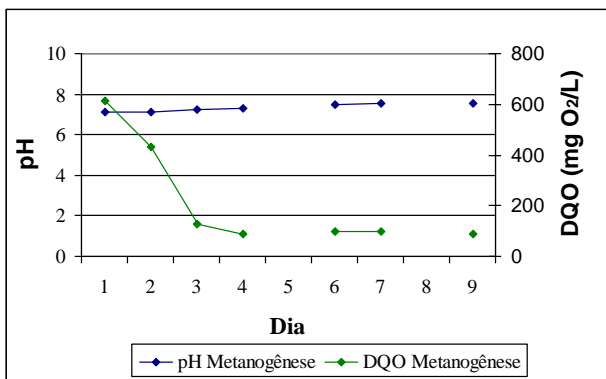


Figura 5.84 – Evolução do pH e DQO na metanogênese – ciclo válido 08

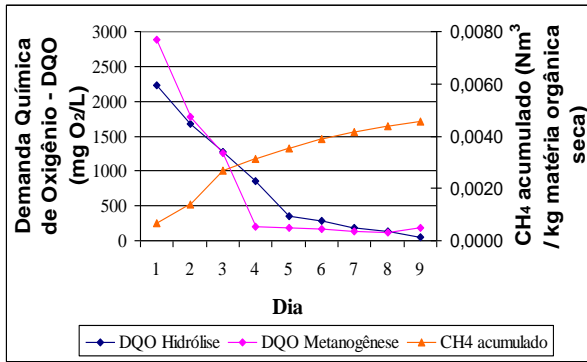


Figura 5.85 – DQO X metano acumulado
– ciclo válido 01

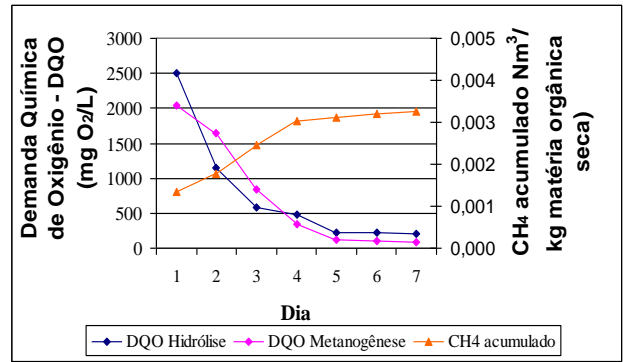


Figura 5.86 – DQO X metano acumulado
- ciclo válido 02

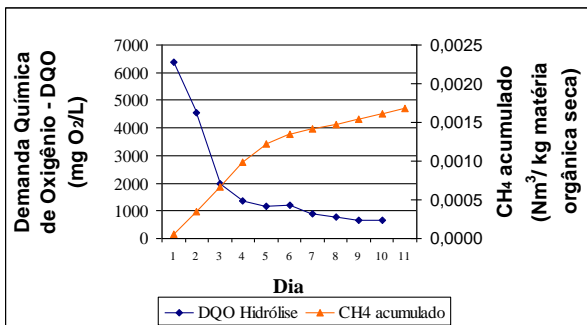


Figura 5.87 – DQO X metano acumulado
– ciclo válido 03

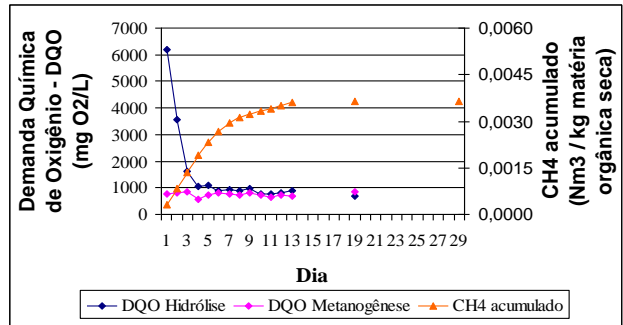


Figura 5.88 – DQO X metano acumulado
- ciclo válido 04

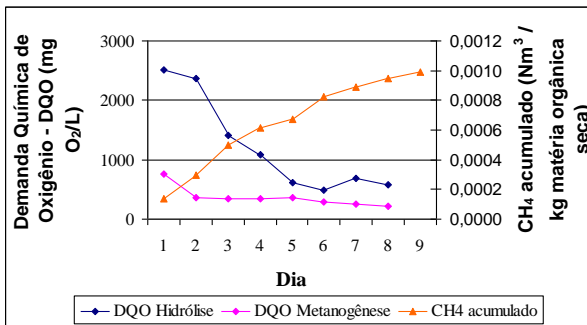


Figura 5.89 – DQO X metano acumulado
– ciclo válido 05

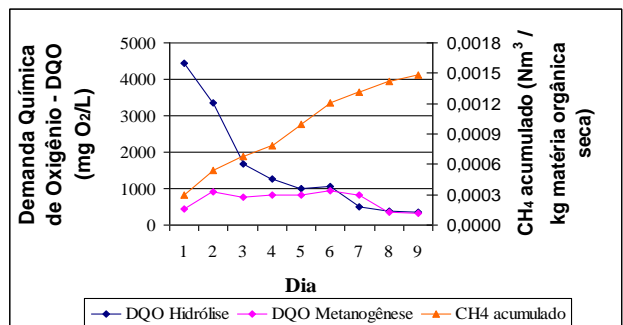


Figura 5.90 – DQO X metano acumulado
- ciclo válido 06

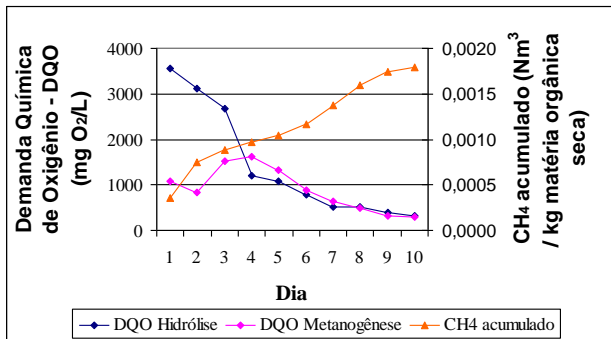


Figura 5.91 – DQO X metano acumulado
– ciclo válido 07

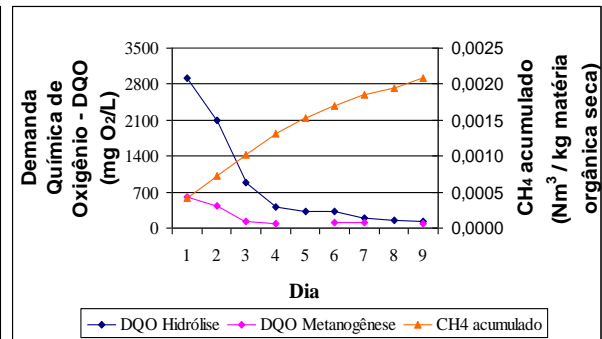


Figura 5.92 – DQO X metano acumulado
- ciclo válido 08

TABELAS COM DADOS INICIAIS DOS CICLOS E MEDIÇÕES REALIZADAS NA PLANTA PILOTO

As tabelas 5.5 a 5.12 a seguir apresentam os dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova, separadas por ciclo válido.

Posteriormente à apresentação das tabelas com os dados iniciais, por ciclo válido, são apresentadas as tabelas 5.13 a 5.20, também separadas por ciclo, contendo as medições realizadas na planta piloto.

Tabela 5.5 – CICLO VÁLIDO 01 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo 1	53,2	0,92 (0,07)	45,9	- Massa total: 32,1 kg - MOS: 14,75 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 7 L* kg MOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 2,40 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	-Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 103:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato
Valor (desvio padrão)

Tabela 5.6 – CICLO VÁLIDO 02 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica a Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo 1	53,2	0,92 (0,07)	45,9	- Massa total: 36,0 kg - MOS: 16,56 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 7 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 3,02 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	-Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 116:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato
Valor (desvio padrão)

Tabela 5.7 – CICLO VÁLIDO 03 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo 2	54,3	3,87 (0,30)	41,84	- Massa total: 38,2 kg - MOS: 16,00 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 2 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 2,12 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	- Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 295:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato

Valor (desvio padrão)

Tabela 5.8 – CICLO VÁLIDO 04 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo 2	54,3	3,87 (0,30)	41,84	- Massa total: 20,6 kg - MOS: 8,62 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 2 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 1,11 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	- Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 288:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato

Valor (desvio padrão)

Tabela 5.9 – CICLO VÁLIDO 05 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo 2	54,3	3,87 (0,30)	41,84	- Massa total: 27,7 kg - MOS: 11,60 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 2 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 0,60 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	- Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 116:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato

Valor (desvio padrão)

Tabela 5.10 – CICLO VÁLIDO 06 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo 2	54,3	3,87 (0,30)	41,84	- Massa total: 25,9 kg - MOS: 10,85 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 2 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 1,00 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	- Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 206:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato

Valor (desvio padrão)

Tabela 5.11 – CICLO VÁLIDO 07 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo ₃	53,9	12,99 (0,69)	33,11	- Massa total: 32,0 kg - MOS: 10,6 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 2 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 0,79 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	- Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 165:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato

Valor (desvio padrão)

Tabela 5.12 – CICLO VÁLIDO 08 - Dados iniciais do bagaço de cana, taxas de circulação de solução na planta piloto e características da solução nova

Identificação do bagaço	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica Seca – MOS (%)	Massa de bagaço de cana carregada nos tanques de hidrólise (kg)	Taxas de circulação de solução	Solução nova – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
Bagaço Novo ₃	53,9	12,99 (0,69)	33,11	- Massa total: 28,0 kg - MOS: 9,3 kg	- Estágio 1: 100 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ ; - Estágio 2: 2 L* kgMOS ⁻¹ * dia ⁻¹ OU 0,56 kg DQO por m ³ volume útil por dia ⁽³⁾	- Nitrogênio: 86,14(0,89) - Fosfato: 65,40(0,92) - Sulfato: 90,05(0,76) Relação DQO:N:P ⁽⁴⁾ 135:4:1

(1) Valor médio dos resultados obtidos em triplicata

(2) Parâmetros analisados sob a forma solúvel

(3) Valor calculado considerando-se o volume útil do reator como 96 L (80% do volume total de 120L)

(4) DQO inicial do 1º estágio, valor de fósforo convertido do fosfato

Valor (desvio padrão)

Tabela 5.13 – CICLO VÁLIDO 01 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)
1	0,0214	0,0214	0,0014	46,9	36,9	0	16,2	0,0050	0,0050	0,0003	7,15	6,79	2227,8	2888,1
2	0,0403	0,0189	0,0027	56,1	38,3	0,1	5,5	0,0097	0,0147	0,0010	7,10	6,96	1671,4	1777,8
3	0,0658	0,0256	0,0045	73,1	25,5	0	1,4	0,0165	0,0313	0,0021	7,36	7,35	1277,8	1255,6
4	0,0755	0,0097	0,0051	73,0	20,8	0	6,2	0,0071	0,0383	0,0026	7,36	7,46	855,6	198,2
5	0,0841	0,0086	0,0057	69,2	19,8	0	11	0,0061	0,0444	0,0030	7,36	7,52	352,4	185,7
6	0,0922	0,0081	0,0062	65,0	18,4	0,1	16,5	0,0054	0,0498	0,0034	7,40	7,56	290,2	165,8
7	0,0987	0,0065	0,0067	59,0	16,4	0,1	24,5	0,0040	0,0539	0,0037	7,41	7,58	189,3	137,8
8	0,1050	0,0063	0,0071	55,0	14,8	0	30,2	0,0036	0,0575	0,0039	7,44	7,65	135,7	123,2
9	0,1101	0,0051	0,0075	46,6	13,1	0,2	40,1	0,0026	0,0601	0,0041	7,54	7,70	44,0	181,5

Tabela 5.14 – CICLO VÁLIDO 02 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)
1	0,0431	0,0431	0,0026	51,7	45,9	0	2,4	0,0111	0,0111	0,0007	6,49	6,31	2504,7	2046,4
2	0,0561	0,0129	0,0034	54,1	40,1	0	5,8	0,0068	0,0180	0,0011	6,96	6,62	1144	1639,9
3	0,0730	0,0169	0,0044	67,1	29,0	0	3,9	0,0102	0,0282	0,0017	7,3	7,13	581,5	848,2
4	0,0856	0,0127	0,0052	75,3	18,7	0	6,0	0,0090	0,0373	0,0022	7,35	7,54	481,5	350,3
5	0,0881	0,0024	0,0053	63,8	16,6	0	19,6	0,0017	0,0389	0,0024	7,42	7,64	223,2	127,4
6	0,0910	0,0029	0,0055	47	12,8	0,4	39,8	0,0016	0,0406	0,0024	7,44	7,79	219	98,2
7	0,0934	0,0024	0,0056	37,8	11,8	0,9	49,5	0,0010	0,0416	0,0025	7,56	7,67	198,2	81,5

Tabela 5.15 – CICLO VÁLIDO 03 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)
1	0,0025	0,0025	0,0002	38,6	18,3	0,2	42,9	0,0005	0,0005	0,0000	5,88	7,45	6362,2	2316,7
2	0,0113	0,0088	0,0007	52,7	32,6	0,2	14,5	0,0040	0,0045	0,0003	6,38	7,35	4536,7	⁽¹⁾
3	0,0201	0,0087	0,0013	57,2	34	0	8,8	0,0048	0,0093	0,0006	6,92	7,1	1988,9	⁽²⁾
4	0,0288	0,0087	0,0018	59,8	30	0	10,2	0,0051	0,0144	0,0009	7,23	7,15	1344,4	⁽²⁾
5	0,0351	0,0063	0,0022	58,2	26,8	0,2	14,8	0,0037	0,0182	0,0011	7,22	7,17	1177,8	⁽²⁾
6	0,0391	0,0040	0,0024	50,3	24,1	0,7	24,9	0,0022	0,0203	0,0013	7,35	7,24	1222,2	⁽²⁾
7	0,0418	0,0027	0,0026	40,6	22,4	1	36	0,0012	0,0216	0,0013	7,38	7,17	900	⁽²⁾
8	0,0443	0,0024	0,0028	34,3	20,6	1,4	43,7	0,0009	0,0225	0,0014	7,4	7,24	794,4	⁽²⁾
9	0,0486	0,0043	0,0030	30	19,9	1,2	48,9	0,0014	0,0239	0,0015	7,43	7,3	655,6	⁽²⁾
10	0,0525	0,0039	0,0033	27,3	18,5	1,1	53,1	0,0011	0,0250	0,0016	7,37	7,77	677,8	⁽²⁾
11	0,0552	0,0027	0,0035	24,8	17,9	1,1	56,2	0,0007	0,0257	0,0016	7,40	7,80	6362,2	⁽²⁾

(1) Ponto seco

(2) Devido à diminuição do nível de solução no tanque de estocagem, as amostras coletadas apresentaram uma quantidade mais significativa de sólidos suspensos e sedimentáveis, acumulados no fundo do tanque, provavelmente provenientes da solução de reinoculação do reator. Devido à influência da solução de reinoculação, as amostras apresentaram resultados de DQO significativamente elevados (variação de 4680 e 23405 mgO₂/L), e que por isso foram descartados e considerados como inválidos.

Tabela 5.16 – CICLO VÁLIDO 04 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)	Solução circulante – nutrientes principais (mg/L) ⁽¹⁾
1	0,0074	0,0074	0,0009	36,6	23,1	0,4	39,9	0,0013	0,0013	0,0002	5,6	7,69	6206,7	768,3	<u>Hidrólise</u>
2	0,0159	0,0085	0,0018	51,8	30	0,5	17,7	0,0038	0,0051	0,0006	5,35	7,38	3558,9	796,1	- Nitrogênio: 12,8
3	0,0238	0,0080	0,0028	58	30,1	0,3	11,6	0,0044	0,0095	0,0011	6,41	7,36	1612,8	862,8	- Fosfato: 110,35 (0,38)
4	0,0320	0,0082	0,0037	57,9	26,4	0,7	15	0,0047	0,0142	0,0016	6,82	7,39	1046,1	585	- Sulfato: 29,64 (0,07)
5	0,0389	0,0069	0,0045	49,6	23,5	1,4	25,5	0,0037	0,0179	0,0021	6,98	7,37	1096,1	729,4	Relação DQO:N:P ⁽³⁾ 82:1:3
6	0,0467	0,0078	0,0054	40,8	22,3	1,6	35,3	0,0035	0,0214	0,0025	7,04	7,4	879,4	801,7	<u>Metanogênese</u>
7	0,0532	0,0065	0,0062	34,3	21,3	1,7	42,7	0,0024	0,0239	0,0028	7,01	7,4	912,8	785	- Nitrogênio: 25,35
8	0,0583	0,0051	0,0068	29,9	20,2	1,8	48,1	0,0016	0,0255	0,0030	7,03	7,48	890,6	740,6	- Fosfato: 115,00 (0,87)
9	0,0618	0,0034	0,0072	27,7	19,4	1,3	51,6	0,0010	0,0265	0,0031	7,05	7,48	985	829,4	- Sulfato: 38,21 (0,21)
10	0,0650	0,0032	0,0075	25,7	18,8	1,5	54	0,0009	0,0274	0,0032	7,09	7,48	768,3	740,6	Relação DQO:N:P ⁽³⁾ 23:1:1
11	0,0683	0,0034	0,0079	23,8	18,6	0,9	56,7	0,0008	0,0282	0,0033	7,2	7,55	751,7	629,4	
12	0,0721	0,0038	0,0084	21,6	17,4	1,5	59,5	0,0009	0,0291	0,0034	7,11	7,49	801,7	735	
13	0,0758	0,0037	0,0088	19,9	16,9	1,6	61,6	0,0008	0,0298	0,0035	7,14	7,53	879,4	685	
19	0,1026	⁽²⁾	0,0119	9,7	15,5	1,2	73,6	⁽²⁾	0,0338	0,0039	7,15	7,56	668,3	846,1	
29	0,1318	⁽²⁾	0,0153	3,0	16,4	1,5	79,1	⁽²⁾	0,0357	0,0041	7,17	7,63	456,3	549,6	

(1) Análise dos parâmetros em sua forma solúvel, realizada no 4º dia do ciclo (fosfato e sulfato analisados em duplicata)

(2) Valores disponíveis apenas para o parâmetro acumulado

(3) Concentrações de nutrientes suficientes para degradação da DQO correspondente, porém com excesso de fósforo
Valor (desvio padrão)

Tabela 5.17 – CICLO VÁLIDO 05 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)	Solução circulante – nutrientes principais (mg/L) ⁽¹⁾
1	0,0055	0,0055	0,0005	29,6	20	0,4	50	0,0008	0,0008	0,0001	5,12	7,39	2503,3	757,2	<u>Hidrólise</u>
2	0,0094	0,0039	0,0008	46,3	27,4	1,2	25,1	0,0015	0,0023	0,0002	5,22	7,24	2370	360,12	- Nitrogênio: 28,3
3	0,0143	0,0048	0,0012	48	25,9	1,6	24,5	0,0023	0,0046	0,0004	5,62	7,23	1416,67	344,44	- Fosfato: 104,62 (0,02)
4	0,0168	0,0025	0,0014	54,7	24,6	1,1	19,6	0,0013	0,0059	0,0005	6,03	7,32	1083,33	344,44	- Sulfato: 70,23 (0,01)
5	0,0183	0,0015	0,0016	45,2	20,3	2,8	31,7	0,0008	0,0066	0,0006	6,77	7,42	622,22	355,56	Relação DQO:N:P ⁽²⁾ 38:1:1
6	0,0229	0,0046	0,0020	37,4	19,3	2,8	40,5	0,0019	0,0085	0,0007	6,83	7,26	488,89	294,44	<u>Metanogênese</u>
7	0,0253	0,0023	0,0022	32,7	19,6	2,5	45,2	0,0008	0,0094	0,0008	6,82	7,3	677,78	255,56	- Nitrogênio: 24,8
8	0,0277	0,0024	0,0024	27,1	19,5	2,1	51,3	0,0007	0,0101	0,0009	6,91	7,42	570,22	211,64	- Fosfato: 121,50 (0,15)
9	0,0299	0,0022	0,0026	22,8	18	1,6	57,6	0,0005	0,0106	0,0009	7,01	7,45	-	-	- Sulfato: 29,58 (0)
															Relação DQO:N:P ⁽²⁾ 14:1:2

(1) Análise dos parâmetros em sua forma solúvel, realizada no 4º dia do ciclo (fosfato e sulfato analisados em duplicata)

(2) Concentrações de nutrientes suficientes para degradação da DQO correspondente, porém com excesso de fósforo
Valor (desvio padrão)

Tabela 5.18 – CICLO VÁLIDO 06 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)	Solução circulante – nutrientes principais (mg/L) ⁽¹⁾
1	0,0067	0,0067	0,0006	47,4	36,2	0,8	15,6	0,0016	0,0016	0,0001	4,83	6,81	4444,44	450,00	<u>Hidrólise</u>
2	0,0131	0,0064	0,0012	42,1	35,1	1,6	21,2	0,0029	0,0045	0,0004	5,28	6,68	3355,56	905,56	- Nitrogênio: 18,23
3	0,0170	0,0039	0,0016	36,5	30,6	2,3	30,6	0,0016	0,0060	0,0006	6,01	6,73	1666,67	766,67	- Fosfato: 112,04 (0,68)
4	0,0206	0,0035	0,0019	34,9	27,6	2	35,5	0,0013	0,0073	0,0007	6,6	6,67	1277,78	833,33	- Sulfato: 66,40 (0,42)
5	0,0263	0,0057	0,0024	38,7	27,4	0,9	33,0	0,0021	0,0094	0,0009	6,76	6,81	994,44	811,11	Relação DQO:N:P ⁽²⁾ 70:1:2
6	0,0314	0,0052	0,0029	46	25,1	1	27,9	0,0022	0,0115	0,0011	6,79	6,88	1066,67	950,00	<u>Metanogênese</u>
7	0,0339	0,0025	0,0031	43,3	20,2	2,6	33,9	0,0011	0,0127	0,0012	6,99	7,27	500,00	833,33	- Nitrogênio: 19,10
8	0,0374	0,0034	0,0034	34,3	15,9	5,1	44,7	0,0013	0,0140	0,0013	7,09	7,26	388,89	344,44	- Fosfato: 119,37 (0,16)
9	0,0397	0,0023	0,0037	28,6	15,9	3,9	51,6	0,0007	0,0147	0,0014	7,11	7,28	348,76	319,2	- Sulfato: 48,28 (0,07)
															Relação DQO:N:P ⁽²⁾ 44:1:2

(1) Análise dos parâmetros em sua forma solúvel, realizada no 4º dia do ciclo (fosfato e sulfato analisados em duplicata)

(2) Concentrações de nutrientes suficientes para degradação da DQO correspondente, porém com excesso de fósforo
Valor (desvio padrão)

Tabela 5.19 – CICLO VÁLIDO 07 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado final de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado final (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)	Solução circulante – nutrientes principais (mg/L) ⁽¹⁾
1	0,0163	0,0163	0,0015	46,1	33,4	1,5	19	0,0038	0,0038	0,0004	4,68	6,26	3566,67	1083,33	<u>Hidrólise</u>
2	0,0261	0,0099	0,0025	37,9	36	2	24,1	0,0041	0,0079	0,0007	4,81	5,62	3111,11	833,33	- Nitrogênio: 9,12
3	0,0305	0,0043	0,0029	31,8	32,4	2	33,8	0,0015	0,0094	0,0009	5,86	5,78	2666,67	1511,11	- Fosfato: 79,15 (0,10)
4	0,0336	0,0031	0,0032	27,3	28,5	2	42,2	0,0009	0,0103	0,0010	6,69	6,35	1200,00	1622,22	- Sulfato: 20,82 (0,01)
5	0,0361	0,0026	0,0034	29,4	27,6	1,1	41,9	0,0007	0,0110	0,0010	7,16	6,77	1077,78	1327,78	Relação DQO:N:P ⁽²⁾ 132:1:3
6	0,0404	0,0043	0,0038	35,1	23	3,2	38,7	0,0014	0,0124	0,0012	7,19	7,02	777,78	877,78	<u>Metanogênese</u>
7	0,0461	0,0057	0,0044	41,3	21,1	2,3	35,3	0,0022	0,0146	0,0014	7,3	7,37	516,67	644,44	- Nitrogênio: 12,41
8	0,0526	0,0065	0,0050	28,3	15,5	5	51,2	0,0023	0,0169	0,0016	7,32	7,26	516,67	500,00	- Fosfato: 86,71 (0,40)
9	0,0581	0,0055	0,0055	28,7	16,5	3,2	51,6	0,0016	0,0184	0,0017	7,33	7,38	383,33	327,78	- Sulfato: 20,35 (0,05)
10	0,0605	0,0024	0,0057	22,6	17,8	2,6	57	0,0006	0,0190	0,0018	7,36	7,45	330,2	301,4	Relação DQO:N:P ⁽²⁾ 131:1:2

(1) Análise dos parâmetros em sua forma solúvel, realizada no 4º dia do ciclo (fosfato e sulfato analisados em duplicata)

(2) Concentrações de nutrientes suficientes para degradação da DQO correspondente, porém com excesso de fósforo
Valor (desvio padrão)

Tabela 5.20 – CICLO VÁLIDO 08 - Medições realizadas na planta piloto

Dia	Volume acumulado biogás (Nm ³)	Volume diário biogás (Nm ³ /dia)	Volume acumulado de biogás (Nm ³) / MOS (kg)	CH ₄ (% no biogás)	CO ₂ (% no biogás)	O ₂ (% no biogás)	Outros gases (% no biogás)	CH ₄ diário (Nm ³ /dia)	CH ₄ acumulado (Nm ³)	CH ₄ acumulado (Nm ³) / MOS (kg)	pH Hidrólise	pH Metanogênese	DQO Hidrólise (mgO ₂ /L)	DQO Metanogênese (mgO ₂ /L)	Solução circulante – nutrientes principais (mg/L) ⁽²⁾
1	0,0078	0,0078	0,0008	48,7	25	0,7	25,6	0,0019	0,0019	0,0002	5,02	7,14	2911,11	611,11	<u>Hidrólise</u>
2	0,0141	0,0063	0,0015	45,6	27,1	2,9	24,4	0,0030	0,0049	0,0005	5,23	7,12	2088,89	433,33	- Nitrogênio: 12,5
3	0,0199	0,0058	0,0022	46,7	27	1,7	24,6	0,0027	0,0076	0,0008	6,43	7,23	877,78	127,78	- Fosfato: 57,45 (0,02)
4	0,0265	0,0066	0,0029	41,9	23,6	2,3	32,2	0,0029	0,0105	0,0011	7,04	7,32	411,11	86,11	- Sulfato: 34,94 (0,48)
5	0,0323	0,0058	0,0035	34,5	22,1	2,6	40,8	0,0022	0,0127	0,0014	7,11	⁽¹⁾	322,22	⁽¹⁾	Relação DQO:N:P ⁽³⁾ 33:1:2
<u>Metanogênese</u>															
6	0,0376	0,0052	0,0041	29,3	20,5	2,7	47,5	0,0017	0,0144	0,0016	7,22	7,46	333,33	100,00	- Nitrogênio: 17,93
7	0,0435	0,0059	0,0047	24,5	19,5	1,8	54,2	0,0016	0,0160	0,0017	7,33	7,54	200,00	100,00	- Fosfato: 77,70 (0,16)
8	0,0451	0,0016	0,0049	20,1	18,3	1,3	60,3	0,0003	0,0163	0,0018	7,33	⁽¹⁾	161,11	⁽¹⁾	- Sulfato: 25,52 (0,05)
9	0,0471	0,0020	0,0051	15,6	16,7	1,8	65,9	0,0004	0,0167	0,0018	7,5	7,57	130,10	89,12	Relação DQO:N:P ⁽³⁾ 5:1:1

(1) Dia de esgotamento do tanque de estocagem, não havendo possibilidade de coleta de amostra.

(2) Análise dos parâmetros em sua forma solúvel, realizada no 4º dia do ciclo (fosfato e sulfato analisados em duplicata)

(3) Concentrações de nutrientes suficientes para degradação da DQO correspondente, porém com excesso de fósforo
Valor (desvio padrão)

Os **ciclos válidos 01 e 02** foram processados com uma vazão de circulação para o 2º estágio do processo de 7 litros por kg MOS por dia. Para estes dois ciclos, esta vazão de entrada no reator anaeróbio foi suficiente para a manutenção do processo.

Todos os demais ciclos válidos, operados a partir do **ciclo válido 03**, tiveram uma redução desta vazão de circulação para o 2º estágio do processo, para um valor de 2 litros por kg MOS por dia. Esta necessidade de redução da vazão ocorreu em função de uma redução repentina e significativa de pH na solução do tanque de estocagem, em virtude do processamento do substrato identificado como Bagaço Novo 1b.

O Bagaço Novo 1b se mostrou com uma acidez mais elevada, o que ocasionou, inicialmente, uma redução acentuada do pH na solução do tanque pulmão. Para esta redução mais significativa de pH, a vazão de circulação estabelecida para o 2º estágio do processo (7 litros por kg MOS por dia) se mostrou inadequada, excessiva para a manutenção do equilíbrio do meio biológico no reator. Este fato ocasionou uma queda do pH também no reator (valores na faixa de 4,0), comprometendo a sobrevivência dos microrganismos presentes. A queda brusca de pH no reator tornou necessária uma reinoculação do mesmo.

A 1ª reinoculação tornou-se necessária após a primeira queda brusca de pH, o que comprometeu o ciclo então em processamento. Este ciclo foi então interrompido, e considerado como ciclo inválido 01.

A primeira reinoculação ocorreu durante o período de aproximadamente 30 dias, até o pH da solução do tanque de estocagem alcançar um valor superior a 7,5. Uma vez alcançado este pH, procedeu-se aos ciclos “pós-reinoculação”, necessários para um novo ajuste da taxa de circulação de solução no 2º estágio do processo.

Os ciclos “pós-reinoculação” foram operados a partir do processamento normal de novas cargas de bagaço de cana. No entanto, a taxa de circulação de solução para o reator foi fixada, inicialmente, em um valor mais reduzido – 1 litro por kg MOS por dia, sendo aumentada gradativamente.

Apesar do aumento gradual desta vazão de circulação, quando se chegou a um valor de 3 litros por kg MOS por dia, e foi trocada a carga de bagaço de cana (disposição de bagaço novo nos tanques de hidrólise), novamente, ocorreu uma redução brusca de pH em todo o

processo. Este ciclo foi considerado como ciclo inválido 02, tornando-se necessária uma 2ª reinoculação do reator.

Todas as amostras do substrato identificado como Bagaço Novo 1b ocasionaram uma queda mais significativa do pH da solução circulante (tanto nos ciclos considerados como inválidos, como nos ciclos “pós-reinoculação”), em relação aos demais substratos processados anteriormente. Desta forma, considerando-se a possibilidade deste evento se repetir com outras amostras de substrato, e pelo fato de que, mesmo com pH reduzido, uma taxa de circulação de 2 litros por kg MOS por dia foi considerada como satisfatória para o processo, optou-se, por segurança, pela adoção desta taxa como padrão para o 2º estágio do processo, a partir do ciclo válido 03. Esta taxa foi considerada, por motivos de segurança operacional, a taxa ótima de circulação para o reator anaeróbio.

A partir do **ciclo válido 04**, optou-se por acondicionar uma quantidade mais reduzida de bagaço nos tanques de hidrólise, de forma que o substrato processado ficasse com um menor nível de compactação, em relação ao ciclo anterior. Uma menor compactação poderia acarretar em uma melhoria da circulação de solução no 1º estágio do processo.

Especificamente no ciclo válido 04, também optou-se por manter o processamento do substrato durante um maior intervalo de tempo, a fim de se verificar o seu comportamento operacional. A partir do 13º dia de processo, quando o percentual de metano já se apresentou inferior a 20%, as medições completas foram realizadas no 19º e 29º dia, visando apenas um acompanhamento final do processo.

Após a finalização do ciclo válido 04, foram verificados problemas operacionais com o sistema de bombeamento do 1º estágio do processo (necessário para possibilitar a percolação de solução pelos tanques de hidrólise), tornando-se necessário o seu envio para manutenção. A necessidade de manutenção acarretou na necessidade de desmontagem do sistema e, portanto o descarte da solução do tanque pulmão.

Após o procedimento de manutenção do sistema, o **ciclo válido 05** foi iniciado com uma solução de circulação no tanque pulmão 100% nova (água nova + biofertilizante), não sendo reaproveitada a solução circulante anterior deste tanque (descartada). Devido ao não aproveitamento da maior parcela da antiga solução, conforme esperado, foi obtido um biogás com um menor percentual de metano, uma vez que o processo se iniciou com uma solução circulante sem carga orgânica prévia.

Em função de novos problemas operacionais com o sistema de bombeamento para os tanques de hidrólise, ao final do ciclo 05, a partir do **ciclo válido 06**, optou-se pelo acionamento manual da bomba, durante todo o ciclo de processo. Todos os ciclos seguintes foram operados desta forma.

O acionamento manual do sistema de bombeamento foi realizado 2 vezes por dia, com um espaçamento aproximado de 12 horas, durante todos os dias do ciclo. Para este acionamento, calculou-se o volume de solução necessário para a circulação total recomendada, de 100 L solução por kg MOS por dia. Considerando-se este volume calculado para a circulação diária de solução (L/dia), procedeu-se à circulação de metade deste valor, em cada acionamento manual da bomba, de modo a se obter, ao final de cada dia, uma circulação total de 100 L solução por kg MOS.

Ressalta-se que, além do sistema de bombeamento para os tanques de hidrólise, foram verificados problemas técnicos no sistema de bombeamento de retorno do efluente proveniente do tanque de estocagem ao tanque pulmão. O retorno da solução ao tanque pulmão é essencial para o processo, uma vez que proporciona a manutenção do nível de solução neste tanque e, portanto o equilíbrio do processo. No entanto, é necessária uma certa quantidade de solução no tanque de estocagem, para que possam ser feitas as amostragens de solução para controle de pH e DQO do reator anaeróbio.

Visando a solução deste problema, optou-se pela abertura / fechamento manual da válvula de interligação entre estes dois tanques, periodicamente.

Esta abertura e fechamento manual da válvula, neste ciclo, foram feitos periodicamente, porém não diariamente. Conforme verificado durante o processamento do ciclo válido 06 (o que foi posteriormente confirmado no **ciclo válido 07**), a abertura e fechamento da válvula periodicamente, porém não de forma sistemática e diária, acarretaram em um retorno não uniforme do efluente ao tanque pulmão. Este retorno não uniforme ocasionou acúmulos temporários (diários) de solução no tanque de estocagem (enquanto a válvula permanecia fechada), ocasionando uma diminuição temporária da solução do tanque pulmão.

Esta variação de volume nos tanques foi percebida, particularmente, nas flutuações dos percentuais de metano no biogás produzido. A diminuição do nível de solução no tanque pulmão (volume mais reduzido) ocasionou, conseqüentemente, uma maior concentração de compostos orgânicos biodegradáveis nesta solução. Nestes períodos, foi verificado, então um

ligeiro aumento do percentual de metano no biogás. Da mesma maneira, o retorno da solução ao tanque pulmão ocasionou um aumento do volume de solução, e portanto uma redução da concentração de compostos orgânicos biodegradáveis (redução do percentual de metano).

Deve ser observado que, apesar de uma redução do volume de solução circulante ser, a princípio, benéfico para a produção de biogás com maior percentual de metano, uma maior concentração de ácidos orgânicos pode levar a uma redução mais significativa do pH, principalmente no início do ciclo, podendo acarretar em uma diminuição do pH no reator anaeróbio, comprometendo o meio biológico presente.

Observa-se ainda que as flutuações de pH, que refletem as concentrações de ácidos orgânicos, também acarretaram em flutuações da DQO.

Durante o processamento do **ciclo válido 07**, assim como do **ciclo válido 08**, o Bagaço Novo 3 apresentou uma acidez mais elevada do que a observada nos ciclos anteriores. Este fato foi verificado a partir dos valores de pH reduzidos (inferiores a 5,0) observados nos primeiros dias de processo. No entanto, o emprego de uma taxa de circulação para o reator anaeróbio mais reduzida (2 L por kg MOS por dia) propiciou a continuidade do ciclo operacional, sem conseqüências negativas para a operação do reator anaeróbio.

Apesar de coletado no momento de sua moagem, o Bagaço Novo 3 foi originado de uma carga de cana-de-açúcar coletada no período final da safra. Devido à estação sazonal chuvosa (mês de dezembro com alta pluviosidade), foi necessário um período de espera para a coleta desta cana, o que ultrapassou, ligeiramente, o ponto de amadurecimento ideal. Além disso, após o corte da cana, parte deste substrato necessitou permanecer estocado, aguardando o processamento na Usina, devido à alta incidência de chuvas na época. A estocagem da cana já cortada, mesmo que temporária, acarreta em uma degradação biológica inicial do material, fazendo com que seja observada uma diminuição do seu pH (cana ácida).

Este fato é confirmado por CTC (2010), segundo a qual as características físico-químicas do bagaço de cana dependem do sistema de colheita da cana, estágio de desenvolvimento vegetativo, condições climáticas anteriores e posteriores à colheita.

Desta forma, a acidez da cana (e conseqüentemente do bagaço) pode ser atribuída, particularmente, à sua época de colheita e tempo de estocagem antes do seu processamento. Em geral, recomenda-se que o intervalo entre o corte e a moagem não ultrapasse 48 horas.

O pH esperado para a cana é de cerca de 5,5. O pH da cana medido no dia em que foi moída a carga de origem do Bagaço Novo 3, apresentou um valor de 4,28.

Ressalta-se que este substrato possui a mesma variedade do Bagaço Novo 1, processado nos ciclos válidos 01 e 02. O Bagaço Novo 1, porém, não apresentou a mesma acidez do Bagaço Novo 3, o que confirma que o manuseio da cana até o seu processamento determina as condições de pH.

Outro parâmetro que se apresentou distinto entre ambos os substratos, apesar de serem da mesma variedade, foi o percentual de cinzas, superior no Bagaço Novo 3. Consequentemente, a matéria orgânica seca – MOS deste substrato foi também inferior aos demais materiais. Observa-se que as diferenças físico-químicas entre as amostras podem ser atribuídas aos mesmos fatores relacionados à acidez do bagaço, mencionados anteriormente.

Deve ser observado que as próprias flutuações do pH durante o ciclo podem ser atribuídas tanto à acidez do bagaço processado (principalmente), bem como às flutuações dos níveis de solução nos tanques pulmão e de estocagem. As flutuações de pH, que refletem as concentrações de ácidos orgânicos, também acarretaram em flutuações da DQO.

No **ciclo válido 08**, em parte dos dias deste ciclo, o acionamento manual do sistema de bombeamento do 1º estágio foi feito uma vez ao dia, sendo neste momento circulado todo o volume de solução necessário para assegurar a taxa de 100 L por kg MOS por dia.

Neste ciclo não foram verificadas flutuações no percentual de metano, conforme ocorrido nos ciclos anteriores. Isto pode ser explicado pela maior regularidade de abertura e fechamento da válvula de retorno de solução do tanque de estocagem ao tanque pulmão. Entretanto, nos dias em que foi realizado apenas um acionamento, foi feito também o fechamento ou abertura da válvula do tanque de estocagem. Esta abertura e fechamento em dias alternados resultou em uma falta de solução no tanque de estocagem em alguns dos dias (ausência de amostras), devido ao esgotamento da solução para o tanque pulmão.

Em relação à análise de nutrientes da solução circulante, realizada no 4º dia de processo, observa-se, nos ciclos em geral, uma diminuição da concentração de nitrogênio e sulfato em relação ao seu teor na solução nova. Isto indica um consumo de nutrientes por parte do processo. Observou-se, no entanto, um aumento da concentração de fosfato, o que comprova a dificuldade de remoção de fósforo no meio. Estas concentrações podem ter sido influenciadas

pelas soluções circulantes anteriores, no caso a solução reaproveitada no tanque de estocagem (que não foi descartada como no tanque pulmão).

Ressalta-se ainda que, nos ciclos 07 e 08, foram obtidas as menores concentrações de nutrientes em relação aos ciclos anteriores, o que indica um maior consumo de nutrientes durante estes ciclos. Este fato pode ter sido influenciado pela maior acidez do bagaço.

O excesso de fósforo no meio pode ainda ser verificado em função das relações DQO:N:P calculadas, tanto para a solução nova como para a solução circulante no 4º dia de processo. Os valores obtidos demonstram que, tendo-se a DQO como parâmetro limitante (a concentração de nutrientes deve ser suficiente para a degradabilidade da DQO correspondente), as concentrações de nitrogênio foram suficientes para a ocorrência do processo. As concentrações de fósforo, por sua vez, se apresentaram mais elevadas do que as de nitrogênio, sendo verificado um excesso de fósforo no meio, já com a solução nova.

5.1.3 - Ciclos Válidos – avaliação conjunta dos ciclos operacionais

5.1.3.1 – Produção de metano e biogás

Em relação aos parâmetros operacionais de processo, apesar da alteração da taxa de circulação de solução para o reator anaeróbio, de 7 para 2 L por kg MOS por dia, ter sido necessária como medida de “segurança” ao equilíbrio do processo biológico no reator, pode-se dizer que, para um bagaço de cana em condições normais (acidez reduzida), a taxa de 7 L por kg MOS por dia atende ao equilíbrio do processo.

Considerando-se as taxas de circulação de solução para o reator anaeróbio mencionadas, estas podem ser convertidas, em cada ciclo, para a massa de carga orgânica em função do volume útil do reator.

Considerando-se os valores médios obtidos para os 08 ciclos válidos, as taxas de 7 e 2 L por kg MOS por dia podem ser consideradas, respectivamente, como 2,71 e 1,03 kg DQO por m³ volume útil do reator por dia (média dos ciclos válidos 01 e 02, e ciclos válidos 03 a 08). Apesar da taxa mais elevada nos primeiros ciclos, o ciclo válido 03 apresentou uma taxa mais elevada que os demais (considerando-se os ciclos de 03 a 08), de 2,12 kg DQO por m³ volume útil do reator por dia, fato este que pode ser atribuído à sua elevada DQO inicial.

Avaliando-se a mudança de taxa de bombeamento para o reator anaeróbio, percebe-se que a maior parte dos ciclos com uma taxa de circulação de 2 L por kg MOS por dia apresentaram um pior desempenho operacional na planta piloto, em geral com um menor volume de biogás produzido bem como um percentual de metano mais reduzido. Entretanto, outros fatores também podem ter contribuído para esta redução, como por exemplo, a exaustão da solução circulante posteriormente ao ciclo 04, e até mesmo o momento de finalização dos ciclos, algumas vezes com percentual de metano já bem reduzido.

Em relação à produção de biogás, o período final dos ciclos apresentou uma diminuição da sua produção diária, sendo que a grande maioria das taxas apresentou uma redução, chegando a cerca de 0,002 a 0,003 Nm³, ou valores ligeiramente superiores a estes, que foram considerados como um valor de incerteza do medidor de vazão e, portanto, como valores insignificantes. Apenas o ciclo válido 01 acabou sendo interrompido quando a produção diária de biogás ainda não havia alcançado esta faixa de valores. Desta forma, apesar destes valores finais de produção de biogás terem sido contabilizados nos gráficos (fazendo até mesmo com que os dados acumulados de biogás ao longo do tempo parecessem “crescentes”), esta produção diária nos dias finais foi considerada como não representativa.

Foi verificado também um aumento da produção acumulada de metano, ao longo do tempo, até uma tendência de estabilização. Esta tendência à estabilização pode ser também confirmada pela diminuição da taxa de produção de metano ao longo do tempo. No entanto, o percentual de metano no biogás apresentou, inicialmente, uma elevação, sendo após alguns dias de ciclo verificado um percentual cada vez mais decrescente, até valores considerados mínimos. Eventuais flutuações neste percentual foram atribuídas a flutuações do nível de solução nos tanques pulmão e de estocagem.

As figuras 5.93, 5.94 e 5.95 apresentam a evolução, para todos os ciclos em conjunto, da produção acumulada de biogás, metano acumulado e percentual de metano no biogás. Foram considerados, para todos os ciclos, os valores obtidos até o 13º dia de processo, sendo desconsiderados apenas as duas últimas medições “isoladas” do ciclo válido 04, realizadas no 19º e 29º dias do ciclo, respectivamente.

Posteriormente à apresentação das figuras 5.93, 5.94 e 5.95, são apresentados gráficos contendo um “resumo estatístico” da produção de metano acumulado e percentual de biogás (figuras 5.96 e 5.97).

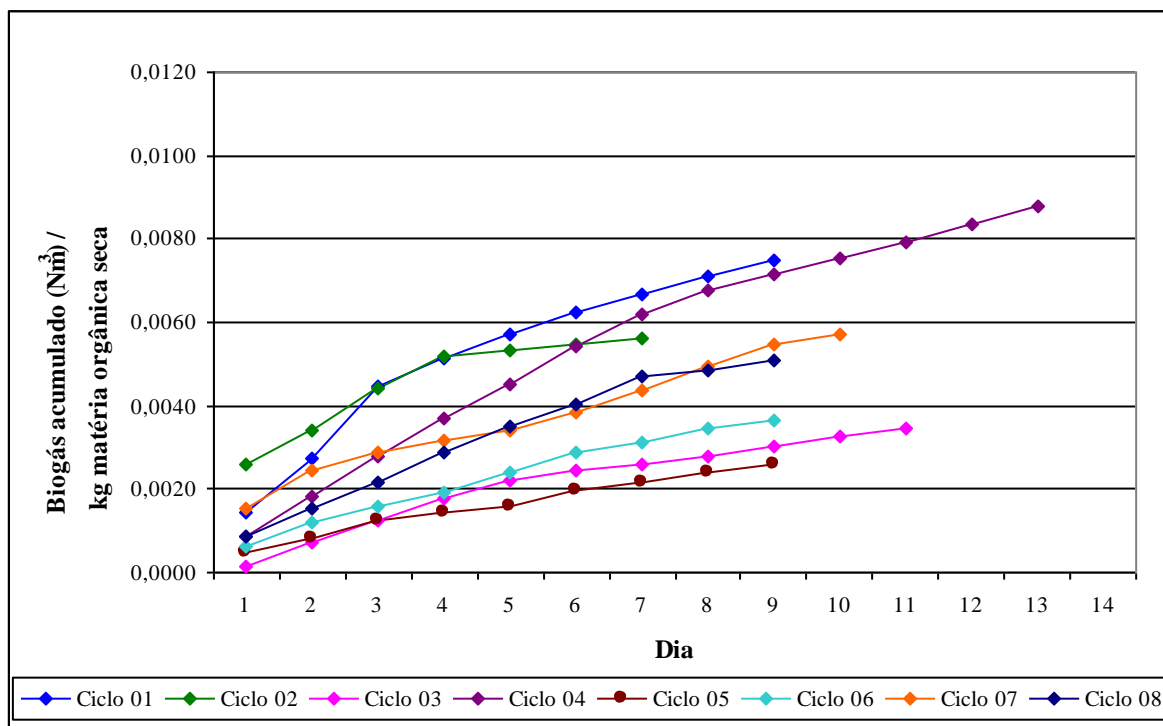


Figura 5.93 – Produção acumulada de biogás – ciclos válidos

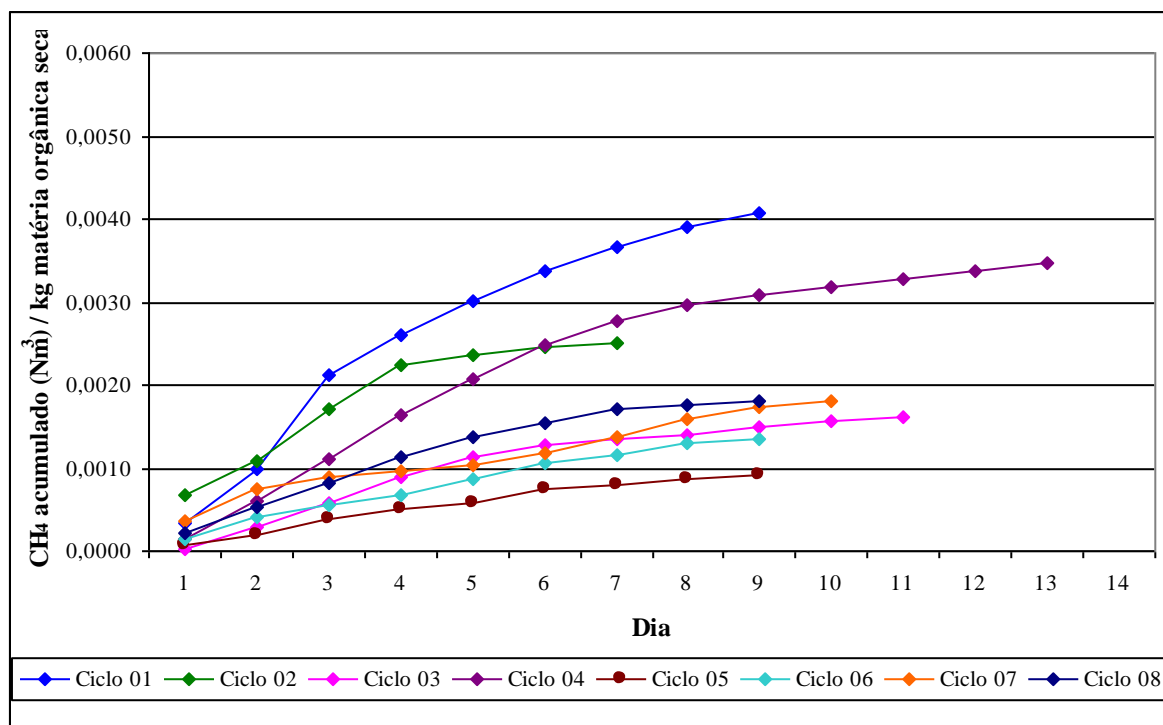


Figura 5.94 – Produção acumulada de metano – ciclos válidos

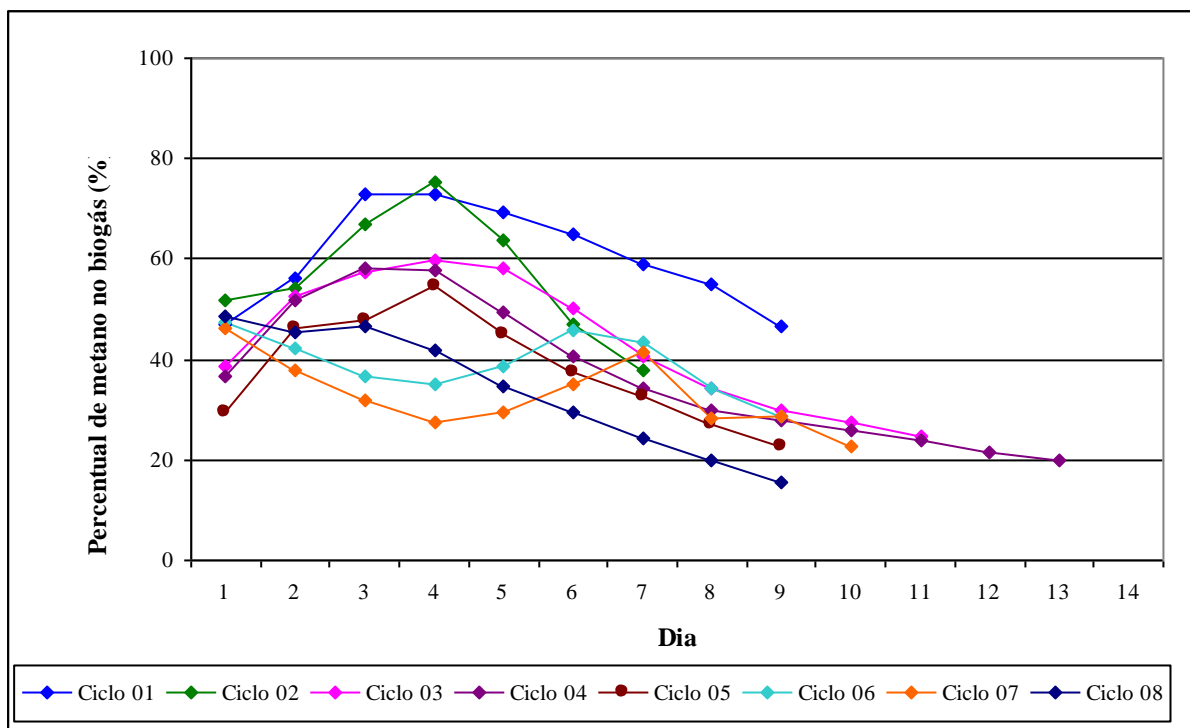


Figura 5.95 – Percentual de metano no biogás – ciclos válidos

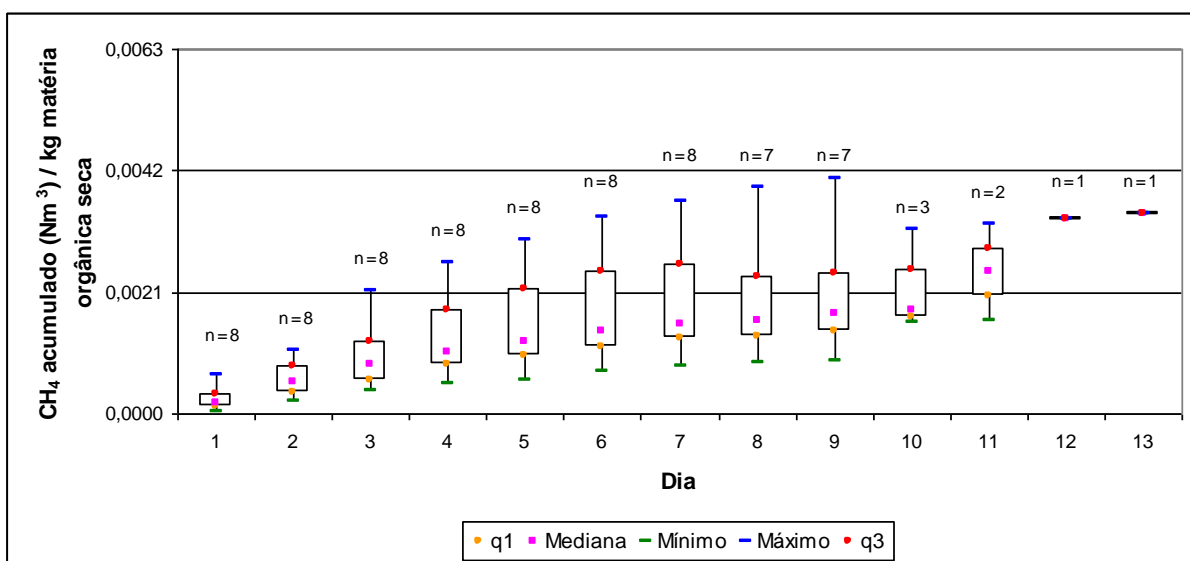


Figura 5.96 – Produção acumulada de metano por dia – Box plot

* n = número de ciclos válidos no dia

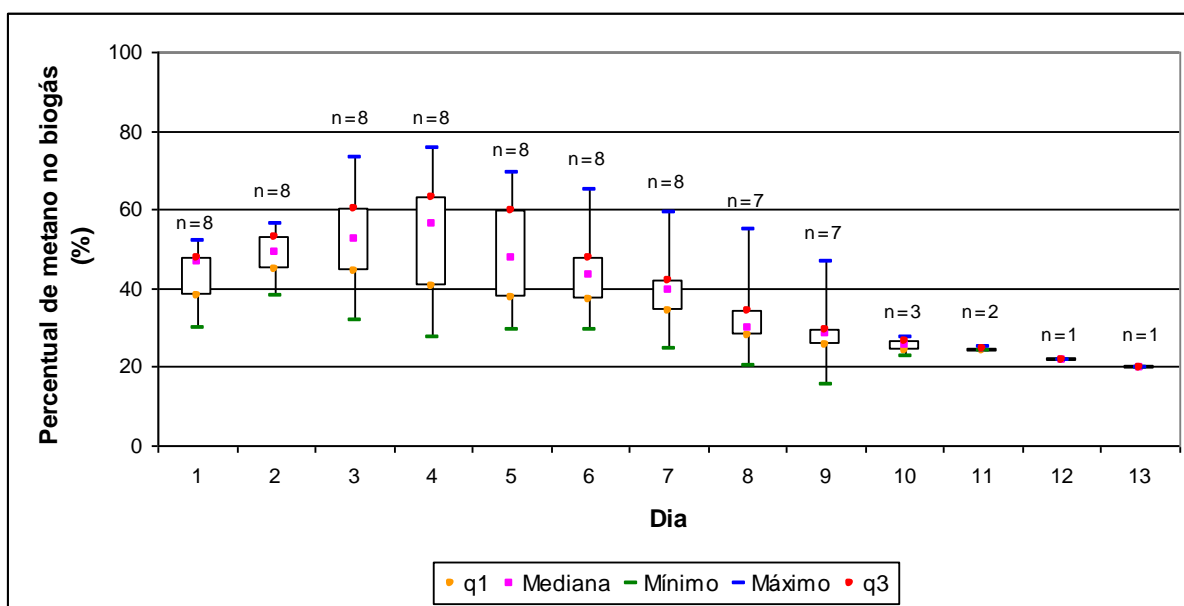


Figura 5.97 – Percentual de metano no biogás por dia – Box plot

* n = número de ciclos válidos no dia

Observando-se as figuras 5.93, 5.94 e 5.95, percebe-se uma variação entre os ciclos de processo. O ciclo 5, que operou após a troca da solução circulante (maior parte) por solução nova, apresentou, conforme previsto, a menor produção de metano e biogás acumulados. Seu percentual de metano, no entanto, não foi o mais reduzido.

Os ciclos iniciais se apresentaram mais produtivos, com maior produção de biogás e metano, mesmo em termos percentuais, atingindo um valor superior a 70%. Considerando-se todos os ciclos de maneira geral, os ciclos 01, 02 e 04 apresentaram-se mais satisfatórios que os demais, com melhor rendimento na produção de biogás (volume), percentual de metano e metano acumulado.

Em relação ao ciclo 03, apesar do mesmo ter apresentado um percentual de metano satisfatório, acarretou em uma das menores produções de biogás, em termos de volume.

As oscilações dos níveis de solução nos ciclos 06 e 07 acarretaram em uma mudança de comportamento dos ciclos, como pode ser visualizado na figura 5.95.

Os ciclos 07 e 08, apesar de não terem apresentado um percentual de metano no biogás muito significativo, apresentaram uma produção de biogás (volume) que compensou os baixos percentuais.

Em termos de percentual de metano no biogás, observa-se, de maneira geral, que este obtém seu valor máximo em torno do 4º dia de processo. Após atingir este valor máximo, é percebido um declínio crescente de seu valor.

Ressalta-se que o percentual de metano no biogás ao final de cada ciclo pode influenciar significativamente o percentual de metano no biogás do ciclo seguinte, dependendo do momento em que se decidir pela finalização do ciclo, em virtude do aproveitamento da solução circulante anterior, ainda rica em compostos orgânicos biodegradáveis. Desta forma, ao se finalizar um ciclo com um percentual de metano ainda relativamente elevado (caso isso seja feito), o próximo ciclo será iniciado com um percentual de metano também já satisfatório, em virtude do aproveitamento da solução circulante anterior, ainda rica em compostos orgânicos biodegradáveis.

Em relação aos demais compostos analisados no biogás – CO₂, O₂ e outros gases – o percentual do dióxido de carbono tendeu a diminuir ao longo do tempo. O oxigênio apresentou apenas pequenas variações ao longo do processo, permanecendo-se reduzido. Já os “outros gases” apresentam uma tendência de aumento ao longo do ciclo, principalmente no final do processo. No ciclo válido 04, que foi mantido em operação por um intervalo superior de tempo, percebe-se que, ao final do ciclo, estão presentes, praticamente, somente o CO₂ e “outros gases”.

A identificação dos compostos pertencentes aos “outros gases” foi feita através de uma amostragem e análise de cromatografia gasosa do gás gerado na planta piloto em um dos dias finais do ciclo de partida inicial da planta piloto. Na medição em questão, foram obtidos os resultados constantes na tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Análise de cromatografia gasosa do “biogás” gerado no período final de um dos ciclos de processo

Composto	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O (balanço)
Concentração (%)	0,00%	0,00%	40,35%	0,00%	31,45%	11,55%	16,65%

Com base nos resultados apresentados na tabela 5.21, percebe-se a presença de 40,35% de N₂ nos gases medidos no período final do ciclo. Este fato pode ser atribuído a alguns fatores operacionais. O período final dos ciclos apresenta, de acordo com os dados obtidos, uma produção “bastante” reduzida de biogás. Esta produção extremamente reduzida de biogás não é suficiente para manter totalmente cheio o volume “livre” do reator anaeróbio (volume não

afofado, que teoricamente estaria preenchido com o biogás produzido). Desta forma, estima-se que uma certa quantidade de ar ambiente tenha se infiltrado, por difusão natural, através da mangueira de saída do biogás, preenchendo um pequeno volume no interior do reator (parte não afofada). Parte do oxigênio presente no ar ambiente teria sido consumido por alguns microrganismos no reator. O nitrogênio gasoso, no entanto, permaneceu inerte às atividades metabólicas dos microrganismos.

Uma provável ilustração deste fato pode ser observada no final do ciclo válido 04, o qual foi mantido em operação por um intervalo de tempo mais elevado, apresenta, ao final do ciclo, uma concentração de metano praticamente nula (3,0%), indicando a baixa produção de biogás. Em contrapartida, a concentração de nitrogênio foi de 79,1%, teor próximo à sua concentração no ar.

Dentre os compostos considerados como “outros gases”, a presença de compostos contendo enxofre e nitrogênio (sulfeto de hidrogênio, amônia e nitrogênio) não são esperados em quantidades significativas, uma vez que há praticamente ausência destes elementos no bagaço de cana (sua possível presença está restrita às cinzas). A sua adição no processo está vinculada, basicamente, à adição de solução nova e, eventualmente, à solução de reinoculação. O teor de nutrientes no esterco bovino varia de acordo com a nutrição do animal.

Considerando-se, por sua vez, as figuras 5.96 e 5.97, observa-se que o percentual de metano se eleva principalmente nos primeiros dias do ciclo, sendo posteriormente reduzido de forma gradual. A produção acumulada de metano apresenta um crescimento gradual, sendo que entre o 10º e 11º dia ocorre uma “estabilização” do valor mediano. Deve ser mencionado que a partir do 8º dia de ciclo, vão sendo desconsiderados, nestas figuras, os ciclos já finalizados (o ciclo 02 é finalizado no 7º dia, o ciclo 01 no 8º, etc). Desta forma, a partir do 8º dia de ciclo os resultados não são provenientes de todos os ciclos em conjunto, sendo os valores obtidos provenientes apenas dos ciclos restantes. Nos últimos 02 dias considerados, apenas o ciclo 04 apresenta resultados disponíveis.

- **Produção de metano acumulado por quilograma de bagaço de cana seco processado**

A tabela 5.22 apresenta uma síntese dos valores de volume acumulado total de metano, para todos os ciclos válidos. Os valores são dados em função da massa de bagaço processado.

Os valores listados foram aqueles obtidos até o último dia de processamento de cada ciclo. Para o ciclo válido 04, foi considerado o valor acumulado até o 13º dia de processo.

Estes valores de volume acumulado de metano foram utilizados posteriormente no cálculo do balanço de energia, para a determinação do poder calorífico referente ao biogás gerado, conforme metodologia apresentada no subitem 4.7.2.

Destaca-se que os valores são dados tanto em função do bagaço seco processado (balanço de energia em base seca), bem como em função do bagaço úmido processado (umidade natural, para o cálculo do balanço de energia em base úmida). Deve ser observado que o metano acumulado por quilograma de bagaço úmido é utilizado somente para o cálculo do balanço de massa a úmido.

Tabela 5.22 – Valores acumulados de metano produzido por quilograma de bagaço seco processado (inicial)

Ciclo válido	Volume acumulado de metano (Nm³ / kg bagaço seco processado)	Volume acumulado de metano (Nm³ / kg bagaço úmido processado) ⁽¹⁾
Ciclo válido 01	0,0040	0,0019
Ciclo válido 02	0,0025	0,0012
Ciclo válido 03	0,0015	0,0007
Ciclo válido 04	0,0032	0,0014
Ciclo válido 05	0,0008	0,0004
Ciclo válido 06	0,0012	0,0006
Ciclo válido 07	0,0013	0,0006
Ciclo válido 08	0,0013	0,0006
VALOR MÉDIO	0,0020 (0,0010)	0,0009 (0,0005)

(1) Umidade natural do bagaço, em cada ciclo de processo. Dado utilizado somente no cálculo do balanço energético em base úmida.

Valor (desvio padrão)

5.1.3.2 – Parâmetros de controle operacional

Considerando-se o parâmetro pH, essencial para o equilíbrio do processo, este se manteve, em geral, em conformidade aos limites recomendados. A redução acentuada do pH foi verificada somente durante o processamento de substratos com maior nível de acidez, provavelmente decorrente de condições não ideais de colheita e intervalo de tempo de armazenamento pós colheita.

Durante os primeiros dias de processamento no aparato descrito, os compostos mais facilmente solubilizáveis e biodegradáveis, tais como açúcares, são biodigeridos. Este fato resulta em um aumento mais significativo da DQO e, conseqüentemente, na queda mais acentuada e repentina do valor de pH, particularmente no 1º estágio (tanques de hidrólise).

Esta relação entre a DQO e o pH da etapa de hidrólise pode ser percebida através dos gráficos destes parâmetros.

Com o passar do tempo, na medida em que vai ocorrendo o consumo dos compostos via digestão anaeróbia, a taxa de biodigestão tende a diminuir, fazendo com que o pH comece a apresentar uma ligeira elevação (diminuição da concentração de ácidos orgânicos).

A redução e posterior aumento do pH na etapa de hidrólise é também percebida na etapa de metanogênese. Por este motivo, um controle rigoroso da taxa de circulação para o reator anaeróbio torna-se imprescindível, para se manter o equilíbrio do processo como um todo.

Deve ser observado, no entanto, que um pH mais reduzido na etapa de hidrólise é considerado benéfico para o processo, uma vez que indica uma eficiência na lixiviação e solubilização de compostos orgânicos biodegradáveis. Esta redução de pH, no entanto, não pode ser repassada para a etapa de processo seguinte. Este controle é feito exatamente pelo controle da vazão de entrada no reator anaeróbio (e conseqüentemente da carga orgânica aplicada ao reator), a qual não deve ultrapassar os limites estabelecidos.

O próprio estabelecimento de uma taxa de circulação ideal no 2º estágio do processo (reator anaeróbio) é difícil de ser definida, uma vez que há uma variação de DQO - e pH - ao longo do ciclo. Desta forma, uma vazão considerada ideal no início do ciclo não será ideal ao seu final, quando a DQO se tornará mais reduzida, e o pH mais elevado. Em uma condição ideal, esta vazão deveria ser alterada ao longo do processo, fato este que, porém é de difícil implementação em sistemas industriais, pois necessitaria de medições instantâneas de DQO e correções instantâneas de vazão, ao longo de um mesmo ciclo.

Considerando-se o parâmetro DQO, este tende a acompanhar as concentrações do material orgânico biodigerido e enriquecido na solução de percolação, representando também, diretamente, o potencial de geração de biogás.

Em relação ao volume ideal de solução circulante no processo, este deve ser melhor pesquisado, especificamente para o bagaço de cana. Não existe, até o presente momento, uma definição quanto a este volume ideal, considerando-se os vários substratos já processados pela tecnologia estudada.

Considerando-se a concentração de nutrientes na solução nova, não houve indicativos de carência de nutrientes no processo. A atividade biológica se apresentou satisfatória, sendo que

o fator de maior limitação no processo está relacionado à composição do substrato processado, rico em fibras, que apresentam difícil digestão.

Ainda em relação à análise de nutrientes da solução circulante, realizada no 4º dia de processo para parte dos ciclos operacionais, observou-se em geral uma diminuição da concentração de nitrogênio e sulfato em relação ao seu teor na solução nova, indicando um consumo de nutrientes por parte do processo. No entanto, na grande maioria dos casos foi verificado um aumento da concentração de fosfato. Estas concentrações podem ter sido influenciadas pelas soluções circulantes anteriores. No entanto, deve ser também considerado que, embora todas as coletas de solução tenham sido realizadas no 4º dia de processo, os referidos ciclos também apresentam um tempo e uma condição diferente de operação, podendo os resultados serem influenciados por esta variável.

5.1.4 – Ciclos válidos - Balanço de massa para o bagaço de cana-de-açúcar

As tabelas 5.23 a 5.28 apresentam o balanço de massa para o bagaço de cana-de-açúcar, considerando-se os ciclos válidos, separados segundo cada variedade de bagaço novo – Bagaço Novo 1, Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3.

Em relação ao parâmetro composição das fibras, conforme observado anteriormente, inicialmente, em virtude da semelhança físico-química entre as amostras de bagaço coletadas na Usina, estimou-se que fosse suficiente a análise deste parâmetro, realizada somente em parte das amostras de bagaço inicial (pelo menos 70% das amostras). A primeira amostra a ser analisada para este parâmetro foi o bagaço coletado em 05/outubro/2009 (2ª coleta) – variedade RB 72454, o qual foi utilizado nos ciclos inválidos 01 e 02.

Desta forma, o percentual das fibras do Bagaço Novo 1 foi considerado como sendo o valor médio entre a energia bruta do Bagaço Novo 1b; Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3.

Tabela 5.23 – Balanço de massa para o bagaço de cana – ciclos processados com o Bagaço Novo 1

Parâmetro	Bagaço Inicial	Bagaço Final	Bagaço Inicial	Bagaço Final
	Ciclo válido 01	Ciclo válido 01	Ciclo válido 02	Ciclo válido 02
Massa úmida (kg)	32,07	76,5	36,00	77,05
Umidade 1 (%) ⁽¹⁾	53,21	82,43	53,21	82,95
Massa seca (kg)	15,00	13,44	16,84	13,14
REDUÇÃO MASSA SECA (%)	-	10,4%	-	22,0%
Umidade 2 (%) ⁽²⁾	-	78,94	-	81,90
Massa úmida 2 (bagaço final) (kg)	-	63,82	-	72,60
Cinzas – base seca (%) ⁽³⁾	0,92 (0,07)	1,11 (0,61)	0,92 (0,07)	1,09 (0,07)
Matéria orgânica seca (%)	45,90	19,90	45,90	17,00
Material volátil - base seca (%) ⁽³⁾	83,66 (0,19)	80,33 (0,05)	83,66 (0,19)	81,96 (0,15)
Material volátil (kg)	12,55	10,80	14,09	10,77
REDUÇÃO MATERIAL VOLÁTIL (%)	-	13,98%	-	23,58%
Carbono fixo – base seca (%)	15,42	18,56	15,42	16,95
ART - amostra natural (%)	4,26	0,5	4,26	0,18
ART (kg)	1,37	0,32	1,53	0,13
ART - base seca (%)	9,10	2,37	9,10	0,99
REDUÇÃO ART - base seca (%)	-	76,64%	-	91,48%
Brix (sólidos solúveis) - amostra natural (%)	4,92	0,60	4,92	0,21
Brix (sólidos solúveis) (kg)	1,58	0,38	1,77	0,15
Brix (sólidos solúveis) - base seca (%)	10,52	2,85	10,52	1,16
REDUÇÃO BRUX - base seca (%)	-	75,73%	-	91,39%
Fibras - amostra natural (%)	41,87	20,46	41,87	17,89
Fibras (kg)	13,43	13,06	15,07	12,99
Fibras - base seca (%)	89,48	97,15	89,48	98,84
REDUÇÃO FIBRAS - base seca (%)	-	2,74%	-	13,84%

(1) Para o bagaço final, é a umidade no momento da pesagem final

(2) Para o bagaço final, é a umidade no momento dos ensaios de ATR, brix e teor de fibras.

(3) Amostragens em triplicata

(Valor) Desvio padrão

O Bagaço Novo 1 inicial, nos ciclos 01 e 02, apresenta os mesmos teores (percentuais) de todos os parâmetros físico-químicos analisados.

Retirada a umidade, o somatório do percentual de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo é 100%, por isto as medições estão em % – base seca. Não é esperada redução para o C fixo.

Tabela 5.24 – Balanço de massa para o bagaço de cana – ciclos processados com o Bagaço Novo 2

Parâmetro	Bagaço Inicial	Bagaço Final	Bagaço Inicial	Bagaço Final	Bagaço Inicial	Bagaço Final	Bagaço Inicial	Bagaço Final
	Ciclo válido 03	Ciclo válido 03	Ciclo válido 04	Ciclo válido 04	Ciclo válido 05	Ciclo válido 05	Ciclo válido 06	Ciclo válido 06
Massa úmida (kg)	38,24	78	20,60	58	27,70	73	25,90	59
Umidade 1 (%) ⁽¹⁾	54,3	82,89	54,3	84,97	54,3	84,20	54,3	83,69
Massa seca (kg)	17,48	13,35	9,41	8,72	12,66	11,53	11,84	9,62
REDUÇÃO MASSA SECA (%)	-	23,63%	-	7,33%	-	8,93%	-	18,75%
Umidade 2 (%) ⁽²⁾	-	78,76	-	84,10	-	82,28	-	82,60
Massa úmida 2 (bagaço final) (kg)	-	62,83	-	54,83	-	65,09	-	55,30
Cinzas – base seca (%) ⁽³⁾	3,87 (0,30)	3,26 (0,48)	3,87 (0,30)	2,04 (1,34)	3,87 (0,30)	3,22 (0,04)	3,87 (0,30)	2,21 (0,15)
Matéria orgânica seca (%)	41,84	17,98	41,84	13,86	41,84	14,50	41,84	15,19
Material volátil - base seca (%) ⁽³⁾	92,66 (6,02)	84,69 (4,13)	92,66 (6,02)	96,32 (2,99)	92,66 (6,02)	88,45 (3,41)	92,66 (6,02)	87,04 (2,4)
Material volátil (kg)	16,19	11,30	8,72	8,40	11,73	10,20	10,97	8,38
REDUÇÃO MATERIAL VOLÁTIL (%)	-	30,20%	-	3,74%	-	13,03%	-	23,63%
Carbono fixo – base seca (%)	3,47	12,05	3,47	1,64	3,47	8,33	3,47	10,75
ART - amostra natural (%)	3,28	1,03	3,28	0,68	3,28	0,77	3,28	0,68
ART (kg)	1,25	0,65	0,68	0,37	0,91	0,50	0,85	0,38
ART - base seca (%)	7,18	4,85	7,18	4,28	7,18	4,35	7,18	3,91
REDUÇÃO ART - base seca (%)	-	48,40%	-	44,82%	-	44,84%	-	55,73%
Brix (sólidos solúveis) - amostra natural (%)	3,71	1,22	3,71	0,81	3,71	0,91	3,71	0,81
Brix (sólidos solúveis) (kg)	1,42	0,77	0,76	0,44	1,03	0,59	0,96	0,45
Brix (sólidos solúveis) - base seca (%)	8,12	5,74	8,12	5,09	8,12	5,14	8,12	4,66
REDUÇÃO BRIX - base seca (%)	-	45,97%	-	41,89%	-	42,36%	-	53,38%
Fibras - amostra natural (%)	42,00	20,02	42,00	15,09	42,00	16,81	42,00	16,59
Fibras (kg)	16,06	12,58	8,65	8,27	11,63	10,94	10,88	9,17
Fibras - base seca (%)	91,90	94,26	91,90	94,91	91,90	94,86	91,90	95,34
REDUÇÃO FIBRAS - base seca (%)	-	21,68%	-	4,38%	-	5,95%	-	15,66%

(1) Para o bagaço final, é a umidade no momento da pesagem final; (2) Para o bagaço final, é a umidade no momento dos ensaios de ATR, brix e teor de fibras.

(3) Amostragens em triplicata

(Valor) Desvio padrão. O Bagaço Novo 2 inicial, nos ciclos 03, 04, 05 e 06, apresenta os mesmos teores (percentuais) de todos os parâmetros físico-químicos analisados.

Retirada a umidade, a soma do percentual de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo é 100%, por isto as medições estão em % – base seca. Não é esperada redução para C fixo.

Tabela 5.25 – Balanço de massa para o bagaço de cana – ciclos processados com o Bagaço Novo 3

Parâmetro	Bagaço Inicial	Bagaço Final	Bagaço Inicial	Bagaço Final
	Ciclo válido 07	Ciclo válido 07	Ciclo válido 08	Ciclo válido 08
Massa úmida (kg)	32,00	71	28,00	64
Umidade 1 (%) ⁽¹⁾	53,9	82,76	53,9	83,48
Massa seca (kg)	14,75	12,24	12,91	10,57
REDUÇÃO MASSA SECA (%)	-	17,02%	-	18,13%
Umidade 2 (%) ⁽²⁾	-	77,84	-	79,22
Massa úmida 2 (bagaço final) (kg)	-	55,24	-	50,88
Cinzas – base seca (%) ⁽³⁾	12,99 (0,69)	10,39 (1,58)	12,99 (0,69)	11,33 (0,05)
Matéria orgânica seca (%)	33,11	11,77	33,11	9,45
Material volátil - base seca (%) ⁽³⁾	76,73 (1,82)	82,24 (3,11)	76,73 (1,82)	79,79 (0,28)
Material volátil (kg)	11,32	10,07	9,90	8,44
REDUÇÃO MATERIAL VOLÁTIL (%)	-	11,07%	-	14,82%
Carbono fixo – base seca (%)	10,28	7,37	10,28	8,88
ART - amostra natural (%)	4,94	0,86	4,94	0,77
ART (kg)	1,58	0,48	1,38	0,39
ART - base seca (%)	10,72	3,88	10,72	3,71
REDUÇÃO ART - base seca (%)	-	69,95%	-	71,68%
Brix (sólidos solúveis) - amostra natural (%)	5,86	1,01	5,86	0,91
Brix (sólidos solúveis) (kg)	1,88	0,56	1,64	0,46
Brix (sólidos solúveis) - base seca (%)	12,71	4,56	12,71	4,38
REDUÇÃO BRUX - base seca (%)	-	70,25%	-	71,78%
Fibras - amostra natural (%)	37,64	21,15	37,64	19,87
Fibras (kg)	12,04	11,68	10,54	10,11
Fibras - base seca (%)	81,65	95,44	81,65	95,62
REDUÇÃO FIBRAS - base seca (%)	-	3,01%	-	4,07%

(1) Para o bagaço final, é a umidade no momento da pesagem final

(2) Para o bagaço final, é a umidade no momento dos ensaios de ART, brix e teor de fibras.

(3) Amostragens em triplicata

(Valor) Desvio padrão

O Bagaço Novo 3 inicial, nos ciclos 07 e 08, apresenta os mesmos teores (percentuais) de todos os parâmetros físico-químicos analisados.

Retirada a umidade, o somatório do percentual de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo é 100%, por isto as medições estão em % – base seca. Não é esperada redução para o C fixo.

Tabela 5.26 – Composição das fibras – ciclos processados com o Bagaço Novo 1

Composição das fibras	Bagaço Inicial – Bagaço Novo 1 ⁽¹⁾	Ciclo válido 01	Ciclo válido 02
Matéria seca	- Lignina: 9,83 % - Hemicelulose: 33,08 % - Celulose: 43,04 %	- Lignina: 11,02 % - Hemicelulose: 33,29 % - Celulose: 50,41 %	- Lignina: 10,89 % - Hemicelulose: 32,62 % - Celulose: 52,69 %
Matéria natural ⁽²⁾	- Lignina: 5,72 % - Hemicelulose: 17,98 % - Celulose: 23,63 %	- Lignina: 1,69 % - Hemicelulose: 5,11 % - Celulose: 7,74 %	- Lignina: 1,66 % - Hemicelulose: 4,96 % - Celulose: 8,02 %

(1) Valores médios entre o Bagaço Novo 1b, Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3.

(2) Substrato contendo umidade natural

Tabela 5.27 – Composição das fibras – ciclos processados com o Bagaço Novo 2

Composição das fibras	Bagaço Inicial – Bagaço Novo 2	Ciclo válido 03	Ciclo válido 04	Ciclo válido 05	Ciclo válido 06
Matéria seca	- Lignina: 14,05 % - Hemicelulose: 33,28 % - Celulose: 50,34 %	- Lignina: 10,57 % - Hemicelulose: 28,51 % - Celulose: 52,22 %	- Lignina: 26,88 % - Hemicelulose: 22,53 % - Celulose: 28,17 %	- Lignina: 15,03 % - Hemicelulose: 28,21 % - Celulose: 37,30 %	- Lignina: 8,34 % - Hemicelulose: 30,03 % - Celulose: 30,97 %
Matéria natural ⁽¹⁾	- Lignina: 10,66 % - Hemicelulose: 25,24 % - Celulose: 38,18 %	- Lignina: 1,97 % - Hemicelulose: 5,31 % - Celulose: 9,73 %	- Lignina: 3,64 % - Hemicelulose: 3,05 % - Celulose: 3,81 %	- Lignina: 2,25 % - Hemicelulose: 4,21 % - Celulose: 5,57 %	- Lignina: 1,15 % - Hemicelulose: 4,13 % - Celulose: 4,26 %

(1) Substrato contendo umidade natural

Tabela 5.28 – Composição das fibras – ciclos processados com o Bagaço Novo 3

Composição das fibras	Bagaço Inicial – Bagaço Novo 3	Ciclo válido 07	Ciclo válido 08
Matéria seca	- Lignina: 5,92 % - Hemicelulose: 32,81 % - Celulose: 27,10 %	- Lignina: 5,83 % - Hemicelulose: 31,40 % - Celulose: 25,22 %	- Lignina: 6,87 % - Hemicelulose: 31,20 % - Celulose: 36,80 %
Matéria natural ⁽¹⁾	- Lignina: 2,96 % - Hemicelulose: 16,41 % - Celulose: 13,55 %	- Lignina: 1,01 % - Hemicelulose: 5,42 % - Celulose: 4,36 %	- Lignina: 1,08 % - Hemicelulose: 4,91 % - Celulose: 5,79 %

(1) Substrato contendo umidade natural

Comparando-se as variedades de bagaço de cana processadas, foram observadas algumas diferenças em sua composição físico-química. Apesar do teor de umidade ser bastante similar entre as 03 variedades processadas, o Bagaço Novo 1 e o Bagaço Novo 3 apresentaram um maior teor de Brix e ART, em relação ao Bagaço Novo 2. O Bagaço Novo 3 apresentou, no entanto, um menor teor de fibras que os demais.

Considerando-se a composição das fibras em cada variedade de bagaço, as hemiceluloses se apresentaram em teores similares para as três variedades. Já a lignina se apresentou superior no Bagaço Novo 2, enquanto a celulose se mostrou inferior no Bagaço Novo 3.

Em termos de redução de massa seca, os ciclos de processo do Bagaço Novo 3 apresentaram uma maior homogeneidade entre os resultados. Os ciclos referentes ao processamento do Bagaço Novo 1 e Bagaço Novo 2, por sua vez, apresentaram resultados mais heterogêneos. De maneira geral, os ciclos 01, 04 e 05 apresentaram as menores reduções, enquanto os ciclos 02 e 03 apresentaram as mais elevadas. De todos os ciclos considerados, o ciclo válido 03 apresentou uma maior redução (23,63%) e o ciclo válido 04 a menor redução (7,33%), seguido do ciclo válido 05 (8,93%). Para os ciclos de maneira geral, não foram observadas reduções significativas de massa seca, o que pode ser justificado pela dificuldade de degradação e biodigestão das fibras presentes.

Em termos de redução de materiais voláteis, os resultados obtidos acompanharam os valores de redução de massa seca. Resultados mais uniformes foram obtidos para os ciclos do Bagaço Novo 3, enquanto os demais apresentaram uma maior variabilidade. Os ciclos com maior e menor redução de materiais voláteis corresponderam aos mesmos observados para a diminuição da massa seca, sendo, respectivamente, o ciclo válido 03 (30,20%) e ciclo válido 04 (3,74%), ambos referentes ao Bagaço Novo 2.

Em relação à redução de ART e brix nas amostras, percebe-se que esta redução foi mais similar para os ciclos de cada variedade de Bagaço Novo processado. Os ciclos com processamento de Bagaço Novo 01 apresentaram uma maior redução destes parâmetros, seguidos pelos ciclos correspondentes ao processo do Bagaço Novo 3 e, finalmente, os ciclos correspondentes ao Bagaço Novo 2. Observou-se ainda que esta maior redução de ART e brix ocorreu nas amostras de bagaço com maior teor inicial destes mesmos parâmetros.

Observou-se ainda que, para os ciclos 07 e 08, apesar de os mesmos não terem apresentado um percentual de metano no biogás muito significativo, houve a produção de um volume mais elevado de biogás, possibilitando então o consumo de ART e brix.

Para as fibras, em todos os ciclos, foi percebida uma redução pouco significativa de seu percentual (base seca). Este fato demonstra uma necessidade de melhoria do processo de biodigestão anaeróbia empregado, visando uma maior taxa de decomposição das fibras.

Deve ser observado que apesar do decréscimo da quantidade total de fibras, o seu percentual (base seca) no bagaço final é superior aos valores do bagaço inicial. Este fato ocorreu devido à redução mais elevada no teor de ART / brix, o que ocasionou o aumento relativo das fibras, em termos percentuais, na composição do bagaço final. A sua quantidade total (kg), no entanto, foi reduzida.

Em termos de percentual relativo das fibras, os ciclos correspondentes ao processamento do Bagaço Novo 1 mantiveram os teores de lignina e hemiceluloses bastante semelhantes aos percentuais iniciais. Para os ciclos de processamento do Bagaço Novo 2, os ciclos 04 e 05 apresentaram uma redução de celulose e hemiceluloses. O ciclo 06 apresentou uma redução, principalmente, de celulose e lignina, enquanto o ciclo 03 uma redução de hemiceluloses e lignina. Para os ciclos correspondentes ao processo do Bagaço Novo 1 (ciclos 01 e 02), e Bagaço Novo 3 (ciclo 08) apresentaram uma elevação relativa do percentual de celulose.

Apesar de ser esperada uma maior redução de celulose e hemiceluloses, alguns ciclos também apresentaram uma redução do teor de lignina. No entanto, todas estas reduções não foram significativas, haja vista que o percentual geral de fibras ao final dos ciclos apresentou uma diminuição reduzida, na maioria dos casos inferior a 7%.

Considerando-se a umidade das amostras, percebe-se que na medição inicial (momento da pesagem do bagaço processado), esta se apresenta ligeiramente superior à umidade analisada posteriormente, quando da realização das análises de ART, brix e fibras. Esta pequena diminuição se deve a perdas naturais.

A tabela 5.29 apresenta a redução de ART, brix e fibras por variedade de bagaço, e para os ciclos em geral.

Os valores elevados de desvio padrão estão relacionados à própria oscilação dos ciclos obtidos, em função do processo biológico.

Tabela 5.29 – Redução de massa seca, materiais voláteis, ART, brix e fibras por variedade de bagaço e ciclos em geral

Bagaço / ciclos de processo	Redução de massa seca (%) ⁽¹⁾	Redução de materiais voláteis – base seca (%) ⁽¹⁾	Redução ART – base seca (%) ⁽¹⁾	Redução brix – base seca (%) ⁽¹⁾	Redução fibras – base seca (%) ⁽¹⁾
Bagaço Novo 1 / ciclos 01 e 02	16,20 (5,8)	18,78 (4,8)	84,06 (7,42)	83,56 (7,83)	8,29 (5,55)
Bagaço Novo 2 / ciclos 03, 04, 05 e 06	14,66 (6,7)	17,65 (10,1)	48,45 (4,45)	45,90 (4,60)	11,92 (7,10)
Bagaço Novo 3 / ciclos 07 e 08	17,58 (0,5)	12,95 (1,9)	70,82 (0,87)	71,02 (0,77)	3,54 (0,53)
MÉDIA GERAL	15,77 (5,7)	16,76 (7,9)	62,94 (16,00)	61,59 (17,09)	8,92 (6,69)

(1) Redução calculada a partir da média entre os valores obtidos.
(Valor) Desvio padrão

A figura 5.98 apresenta uma representação gráfica dos valores da tabela 5.29.

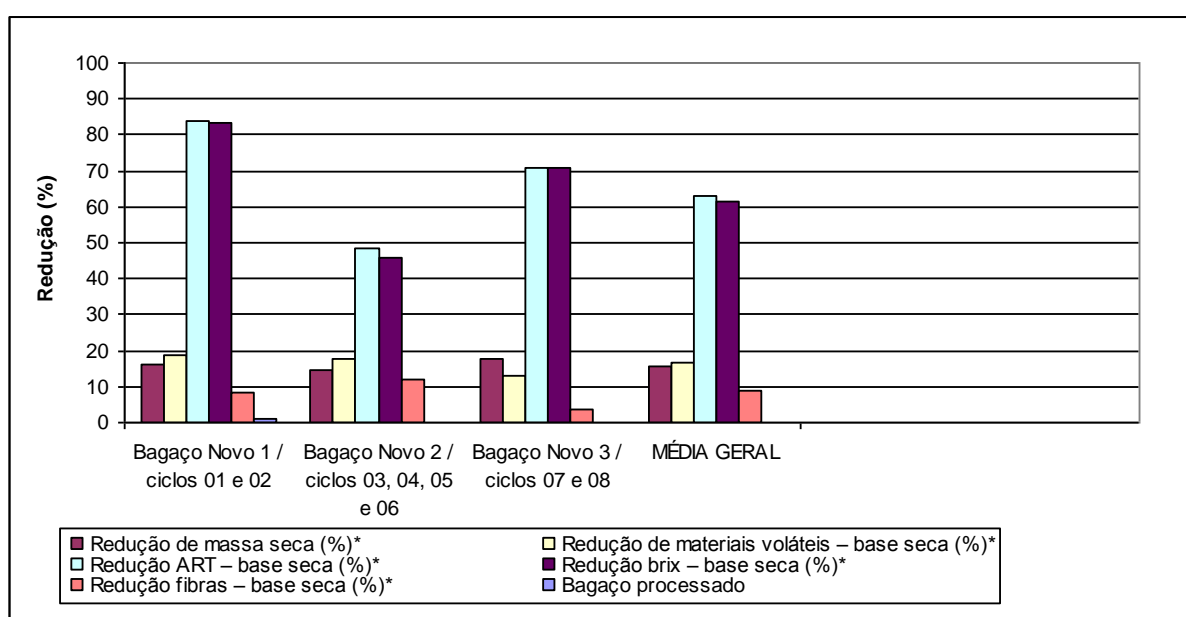


Figura 5.98 – Redução de massa seca, materiais voláteis, ART, brix e fibras por variedade de bagaço

Comparando-se as curvas típicas de processo dos ciclos válidos com os respectivos balanços de massa, pode-se perceber uma confirmação do melhor rendimento dos ciclos 01 e 02. Os mesmos apresentaram uma maior produção de biogás e melhor rendimento no que diz respeito ao percentual de metano no gás combustível. Estes resultados estão em concordância com a maior redução de ART e brix, verificada para estes ciclos.

Analisando-se os gráficos e tabelas em conjunto, percebe-se que, apesar de ter ocorrido um maior consumo de açúcar e fibras no ciclo 02, a sua produção de biogás e metano foi inferior à do ciclo 01. Estima-se que este fato tenha ocorrido devido a uma quantidade residual de água de circulação do ciclo de transição, que apresentava solução circulante da biodigestão dos resíduos do teste de comissionamento da planta.

O ciclo 04, que também se mostrou entre os mais satisfatórios no que diz respeito ao volume de biogás produzido e percentual de metano, apresentou, no entanto, uma redução de ART e brix similar aos ciclos 03 e 05. Os ciclos 03, 05 e 06, apesar de estarem entre os piores ciclos em termos de volume de biogás produzido e metano acumulado, apresentaram percentuais de redução semelhantes de ART e brix, ou mesmo superiores (no caso do ciclo 06), em relação ao ciclo 04.

Os ciclos 07 e 08 foram beneficiados pelo volume de biogás produzido, que compensou os percentuais de metano não elevados, e acarretaram em uma redução de ART e brix superior aos ciclos 03, 04, 05 e 06.

De maneira geral, uma maior redução de ART e brix ocorreu nas amostras de bagaço com maior teor inicial destes parâmetros.

Comparando-se ainda os resultados obtidos para os ciclos do Bagaço Novo 1 e Bagaço Novo 3, percebe-se que, apesar de serem constituídos pela mesma variedade, o rendimento dos últimos ciclos foi inferior ao dos primeiros. Este fato pode ter sido influenciado pelo teor de cinzas do Bagaço Novo 3, que é superior ao do primeiro substrato. No entanto, a vazão de circulação do 2º estágio também foi diferenciada para os ciclos processados, de forma que esta influência também contribuiu para o seu rendimento.

Os ciclos de processo do Bagaço Novo 2 foram os que tiveram o menor rendimento, de maneira geral. Este fato pode ter sido influenciado pela sua variedade, que é distinta em relação a dos demais substratos. No entanto, a própria alteração da vazão de circulação do 2º estágio já influencia nos resultados obtidos, assim como outros fatores, tais como a retirada da solução do tanque pulmão (quando do envio do sistema de bombeamento para reparo técnico), fazendo com que uma solução contendo compostos a serem biodegradados fosse descartada e substituída pela “solução nova”.

Desta maneira, não é possível estabelecer, com segurança, um padrão de comportamento de processo separado por variedade de cana. Bagaços de mesma variedade podem ter

características diferentes (por exemplo, o percentual de cinzas), que podem ser provenientes inclusive da época da colheita e período de acondicionamento da cana antes da moagem. Além disso, também não é possível estabelecer um padrão de comportamento, com segurança, baseando-se no percentual de cinzas do bagaço. O rendimento dos ciclos, de maneira geral, foi superior para o Bagaço Novo 1 (menor teor de cinzas), porém foi seguido do Bagaço Novo 3 (maior teor de cinzas), e posteriormente Bagaço Novo 2 (teor de cinzas intermediário). Desta forma, não foi possível determinar uma correlação específica e/ou previsão de comportamento entre o percentual de cinzas e o rendimento do processo.

Ressalta-se, ainda, que os resultados de cada ciclo podem depender significativamente do momento de finalização dos ciclos anteriores. Desta forma, se um ciclo é finalizado com um percentual de metano muito reduzido no biogás, o próximo ciclo terá seu desempenho (em termos de percentual de metano) afetado negativamente, na medida em que terá que elevar mais o percentual de metano. Caso um novo ciclo se inicie com uma produção ainda satisfatória de metano (% no biogás), este apresentará uma vantagem em termos deste percentual.

Este fato descrito pode ter influenciado os ciclos válidos aqui estudados. No caso do ciclo 05, o baixo percentual de metano está relacionado à troca de grande parte da solução de circulação por solução nova.

Ressalta-se ainda que, apesar de ter sido obtido biogás com percentual de metano satisfatório para aplicação como combustível, o volume de biogás produzido para o processamento do bagaço de cana foi reduzido, se comparado ao volume produzido com o processamento de outros substratos, nos quais apenas o metano acumulado pode alcançar um valor de até 0,1 a 0,4 Nm³ por kg MOS (valor de referência). Este fato pode também ser confirmado observando-se a quantidade de bagaço final processado, em cada ciclo. Considerando-se o percentual de redução de massa seca, não se observa uma redução da quantidade de substrato nos tanques de hidrólise, indicando que ainda existe um potencial para o melhor aproveitamento e biodigestão do bagaço neste processo.

5.2 - Balanço energético das rotas 1 e 2 – rotas tradicional e alternativa para produção de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar

As figuras 5.99 e 5.100 apresentam um desenho esquemático das rotas de processo 1 e 2 consideradas.

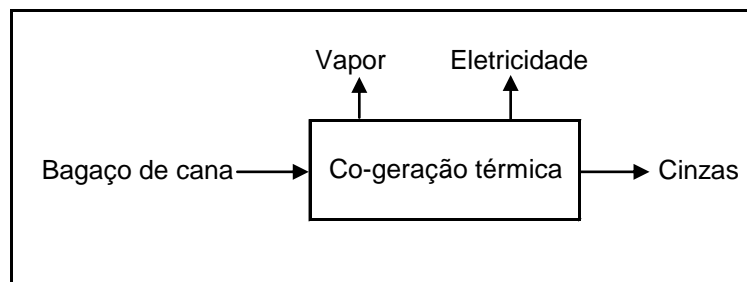


Figura 5.99 – Desenho esquemático da Rota 1 - tradicional

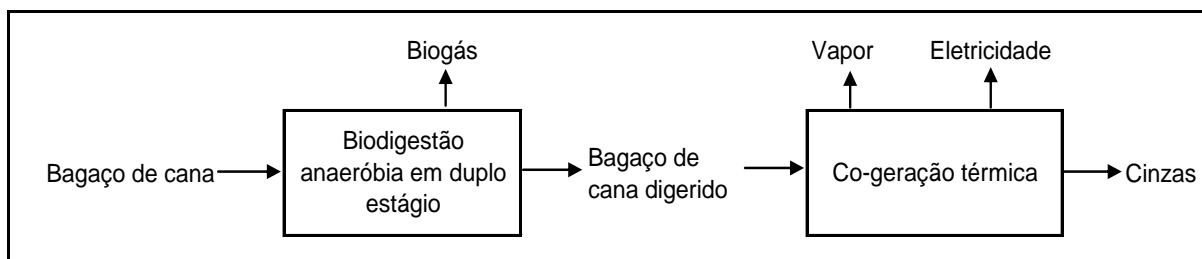


Figura 5.100 – Desenho esquemático da Rota 2 - alternativa

5.2.1 – Poder calorífico inferior – PCI do bagaço de cana-de-açúcar

Os valores de PCI do bagaço de cana-de-açúcar, iniciais e processados, foram calculados de acordo com as equações 4.6 e 4.7, estabelecidas para a determinação do PCI em base seca e base úmida, respectivamente. Estas duas condições foram consideradas para o cálculo do balanço energético.

Conforme observado para o parâmetro composição das fibras, inicialmente, em virtude da semelhança físico-química entre as amostras de bagaço coletadas na Usina, adotou-se que fosse suficiente que a análise de energia bruta fosse realizada somente em parte das amostras de bagaço inicial (pelo menos 70% das amostras). A primeira amostra a ser analisada para este parâmetro foi o bagaço coletado em 05/outubro/2009 (2ª coleta) – variedade RB 72454.

Desta forma, o valor da energia bruta do Bagaço Novo 1 foi considerado como sendo o valor mediano entre a energia bruta do Bagaço Novo 1b; Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3.

5.2.1.1 – Poder calorífico inferior – PCI na base seca

Este subitem apresenta os resultados da determinação do PCI em base seca (bagaço seco).

A tabela 5.30 apresenta os valores de PCI (base seca) calculados para cada ciclo válido; para cada variedade de cana-de-açúcar; e para os ciclos em geral.

Tabela 5.30 – Valores de PCI (Base Seca) do bagaço de cana-de-açúcar inicial e final

Bagaço Novo	Energia bruta - PCS (kcal/kg)	PCI do Bagaço Novo (kcal/kg)	PCI do Bagaço Novo - geral (kcal/kg) ⁽²⁾	Bagaço final - após processamento nos ciclos válidos	Energia bruta - PCS (kcal/kg)	PCI do Bagaço Final - ciclo válido (kcal/kg)	PCI do Bagaço Final - por variedade de cana (kcal/kg) ⁽²⁾	PCI do Bagaço Final - geral (kcal/kg) ⁽²⁾
Bagaço Novo 1 ⁽¹⁾	4181,10	4097,33		Ciclo válido 01	4.731,16	4.647,39	4722,46	
				Ciclo válido 02	4.881,30	4.797,53		
Bagaço Novo 2	4285,22	4201,45	4061,66	Ciclo válido 03	4.409,78	4.326,00	4236,53	4162,30
				Ciclo válido 04	4.277,75	4.193,98		
				Ciclo válido 05	4.288,85	4.205,08		
				Ciclo válido 06	4.304,84	4.221,06		
Bagaço Novo 3	3969,97	3886,20		Ciclo válido 07	3.773,03	3.689,26	3527,91	
				Ciclo válido 08	3.450,33	3.366,56		

(1) PCI calculado a partir da média entre a energia bruta obtida para o Bagaço Novo 1b, Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3

(2) Valor médio obtido

Pelos resultados obtidos (base seca), são percebidos comportamentos distintos para as amostras de bagaço de cana.

Para os ciclos referentes ao processamento do Bagaço Novo 1, o fato das análises de PCI não terem sido realizadas diretamente neste substrato, pode ter contribuído para a diferença entre os valores de PCI encontrados. Ao longo do processamento dos ciclos válidos em geral, percebeu-se que existem diferenças físico-químicas entre as amostras de bagaço processadas, que acarretaram na execução de alguns ciclos operacionais bastante específicos. Estas diferenças podem ser atribuídas tanto às diferentes variedades existentes, e, principalmente, às condições de colheita e armazenamento da cana.

Em relação aos ciclos de processamento do Bagaço Novo 2, todos os testes no bagaço final, em todos os ciclos, apontam para um ligeiro aumento de PCI, em relação ao bagaço inicial. Por outro lado, para os ciclos referentes à utilização do Bagaço Novo 3 como substrato, o PCI do bagaço final se apresentou inferior ao bagaço inicial. No ciclo 07, no entanto, esta diminuição foi menos significativa.

Estas variações de PCI, no entanto, não são consideradas significativas, podendo ser atribuídas à própria variabilidade natural das amostras. Pode ser ainda considerado o fato de que um aumento percentual das fibras ao final do processo (em virtude do consumo de ART, o percentual de fibras se torna relativamente maior), pode acarretar em um ligeiro aumento de PCI do bagaço, haja vista que seu poder calorífico é mais significativo que o dos açúcares inicialmente presentes.

Desta forma, considerando-se estes valores de poder calorífico, bem como biodegradabilidade reduzida das fibras - fazendo com que as mesmas permaneçam em grande quantidade no substrato final, pode-se deduzir que não houve variações significativas no PCI do bagaço após a biodigestão, e que o maior percentual de energia disponível neste substrato, é proveniente das fibras remanescentes.

Em relação aos ciclos 07 e 08, observa-se uma diminuição de, respectivamente, 3 e 11% do PCI do bagaço final, em relação ao inicial. Para estes ciclos, houve uma diminuição (não significativa) do PCI verificada, sendo que as análises de balanço de massa indicam uma redução do teor de ART, brix e fibras.

A redução dos parâmetros ART, brix e fibras, acompanhada, no entanto, de uma redução não significativa de PCI, pode ser explicada pela produção não significativa de biogás, em termos de volume. Desta forma, apesar de haver uma redução dos parâmetros mencionados, esta não é suficiente para acarretar em uma perda significativa de PCI.

5.2.1.2 – Poder calorífico inferior – PCI na base úmida

Este subitem apresenta os resultados da determinação do PCI em base úmida: bagaço inicial com 50% de umidade e bagaço final com 60% de umidade.

A tabela 5.31 apresenta os valores de PCI (base úmida) calculados para cada ciclo válido, para cada variedade de cana-de-açúcar, e para os ciclos em geral. Observa-se que os valores de PCI em base úmida são expressos por quilograma de bagaço úmido.

Tabela 5.31 – Valores de PCI (Base Úmida) do bagaço de cana-de-açúcar inicial e final

Bagaço Novo	Energia bruta - PCS (base seca) (kcal/kg)	PCI do Bagaço Novo (kcal/kg)	PCI do Bagaço Novo - geral (kcal/kg) ⁽²⁾	Bagaço final - após processamento nos ciclos válidos	Energia bruta - PCS (base seca) (kcal/kg)	PCI do Bagaço Final - ciclo válido (kcal/kg)	PCI do Bagaço Final - por variedade de cana ⁽²⁾ (kcal/kg)	PCI do Bagaço Final - geral ⁽²⁾ (kcal/kg)
Bagaço Novo 1⁽¹⁾	4181,12	1653,65		Ciclo válido 01	4731,16	1432,67	1462,70	
				Ciclo válido 02	4881,30	1492,72		
Bagaço Novo 2	4285,24	1705,7	1635,81	Ciclo válido 03	4409,78	1304,11	1268,33	1238,63
				Ciclo válido 04	4277,75	1251,31		
				Ciclo válido 05	4288,85	1255,74		
				Ciclo válido 06	4304,84	1262,14		
Bagaço Novo 3	3969,99	1548,08		Ciclo válido 07	3773,03	1049,42	984,88	
				Ciclo válido 08	3450,33	920,34		

(1) PCI calculado a partir da média entre a energia bruta obtida para o Bagaço Novo 1b, Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3; (2) Valor médio obtido; Bagaço Novo: 50% umidade; Bagaço Final: 60% umidade

Conforme já esperado, pelos resultados obtidos (base úmida), percebe-se o grande efeito da umidade no poder calorífico do bagaço de cana, o qual apresentou uma redução significativa em relação ao PCI do bagaço seco.

De acordo com os resultados obtidos, e conforme mencionado para o bagaço seco, são percebidos comportamentos distintos para as variedades de bagaço de cana. No entanto, diferentemente da condição anterior, os cálculos do PCI em base úmida não apontam uma elevação deste parâmetro no bagaço final, em relação ao inicial. Todos os valores obtidos para o PCI do bagaço final são inferiores àqueles obtidos para o bagaço inicial. Entretanto, entende-se que a elevação da umidade do substrato final (60%) em relação ao inicial (50%) contribuiu para este fato, fazendo com que o PCI calculado já apresentasse, ao final do processo, uma tendência à redução, em relação aos valores obtidos para o bagaço inicial.

Comparando-se os valores de PCI para os três tipos de bagaço processado, percebe-se uma maior redução dos valores nos ciclos de processo referentes ao Bagaço Novo 3 (36,4%), seguido do Bagaço Novo 2 (25,6%), e finalmente do Bagaço Novo 1 (11,5%).

Deve ser mencionado, no entanto, que para os ciclos referentes ao processamento do Bagaço Novo 1, o fato das análises de PCI não terem sido realizadas diretamente neste substrato, pode ter contribuído para a diferença entre os valores de PCI encontrados. Ao longo do processamento dos ciclos válidos em geral, percebeu-se que existem diferenças físico-químicas entre as amostras de bagaço processadas, que acarretaram na execução de alguns ciclos operacionais bastante específicos. Estas diferenças podem ser atribuídas tanto às diferentes variedades existentes, e, principalmente, às condições de colheita e armazenamento da cana.

5.2.2 – Poder calorífico inferior – PCI do biogás produzido

Os valores de PCI do biogás produzido foram calculados de acordo com o poder calorífico do metano puro e o volume acumulado total de metano produzido em cada ciclo de processo, conforme descrito no subitem 4.7.2.

As tabelas 5.32 e 5.33 apresentam os valores de PCI calculados para cada ciclo válido; para cada amostra de variedade de cana-de-açúcar; e para os ciclos em geral.

Considerando-se as condições normais, o poder calorífico do metano foi considerado como 11.228,4 kcal/Nm³. Os valores constantes nas tabelas 5.32 e 5.33 são expressos por quilograma de bagaço seco e por quilograma de bagaço úmido, respectivamente.

Destaca-se que o poder calorífico em termos do bagaço úmido foi calculado apenas para fins de balanço energético em base úmida.

Tabela 5.32 – Valores de Poder Calorífico do biogás produzido (expressos por quilograma de bagaço seco processado)

Ciclo válido	Volume acumulado de metano (Nm ³ / kg bagaço seco)	Poder calorífico por ciclo válido (kcal / kg bagaço seco)	Volume acumulado de metano por variedade de cana (Nm ³ / kg bagaço seco) ⁽¹⁾	Poder calorífico por variedade de cana (kcal / kg bagaço seco)	Volume acumulado de metano no biogás - geral (Nm ³ / kg bagaço seco) ⁽²⁾	Poder calorífico geral (kcal / kg bagaço seco)
Ciclo válido 01	0,0040	44,91	0,0033	37,05	0,0020	22,46
Ciclo válido 02	0,0025	28,07				
Ciclo válido 03	0,0015	16,84				
Ciclo válido 04	0,0032	35,93	0,0017	19,09	0,0020	22,46
Ciclo válido 05	0,0008	8,98				
Ciclo válido 06	0,0012	13,47	0,0013	14,60	0,0020	22,46
Ciclo válido 07	0,0013	14,60				
Ciclo válido 08	0,0013	14,60				

(1) Média dos volumes de metano acumulados por variedade de cana.

(2) Média geral dos volumes de metano acumulados.

Tabela 5.33 – Valores de Poder Calorífico do biogás produzido (expressos por quilograma de bagaço úmido processado – umidade natural)

Ciclo válido	Volume acumulado de metano (Nm ³ / kg bagaço úmido)	Poder calorífico por ciclo válido (kcal / kg bagaço úmido)	Volume acumulado de metano por variedade de cana (Nm ³ / kg bagaço úmido) ⁽¹⁾	Poder calorífico por variedade de cana (kcal / kg bagaço úmido)	Volume acumulado de metano no biogás - geral (Nm ³ / kg bagaço úmido) ⁽²⁾	Poder calorífico geral (kcal / kg bagaço úmido)
Ciclo válido 01	0,0019	21,33	0,0016	17,40	0,0009	10,39
Ciclo válido 02	0,0012	13,47				
Ciclo válido 03	0,0007	7,86				
Ciclo válido 04	0,0014	15,72	0,0008	8,70	0,0009	10,39
Ciclo válido 05	0,0004	4,49				
Ciclo válido 06	0,0006	6,74	0,0006	6,74	0,0009	10,39
Ciclo válido 07	0,0006	6,74				
Ciclo válido 08	0,0006	6,74				

(1) Média dos volumes de metano acumulados por variedade de cana.

(2) Média geral dos volumes de metano acumulados.

O poder calorífico obtido para cada ciclo de processo, em termos de quilograma de bagaço seco, se apresentou bastante reduzido, refletindo a baixa biodegradabilidade das fibras presentes no bagaço de cana.

Comparando-se os valores do poder calorífico para os diferentes ciclos, estes refletem os resultados já comentados. Os ciclos 01, 02 e 04 se constituíram nos melhores em termos de produção de biogás e percentual de metano, acompanhando os valores mais elevados de poder calorífico. O ciclo 05, por sua, considerado um dos menos satisfatórios, apresentou o poder calorífico mais reduzido.

Em termos de variedade da cana, os ciclos envolvendo o processamento do Bagaço Novo 1 apresentaram os valores de poder calorífico mais elevados, seguidos dos ciclos do Bagaço Novo 2, e Bagaço Novo 3, respectivamente. Os resultados do ciclo 04 elevaram o valor de PCI referente ao Bagaço Novo 2.

Comparando-se os valores do poder calorífico por ciclo (kcal/kg bagaço seco) entre o biogás e o bagaço final, observa-se que o potencial energético do biogás gerado é bastante inferior ao potencial do bagaço, o que demonstra novamente a necessidade de otimização do processo de biodigestão, a ser conseguida com o pré-tratamento do bagaço.

Destaca-se que para verificação da eficácia do processo de biodigestão anaeróbia, o poder calorífico do biogás para os diferentes ciclos foi comparado considerando-se os valores em base seca. Os valores obtidos em base úmida foram calculados exclusivamente para fins do balanço energético em base úmida.

5.2.3 – Balanço energético final

A seguir é apresentado o balanço energético final para as “Condições” 1 e 2: poder calorífico do bagaço de cana em base seca e em base úmida.

5.2.3.1 – Balanço energético na Condição 1: bagaço de cana em base seca

A tabela 5.34 apresenta a comparação entre os valores de PCI das amostras de bagaço novo e do somatório dos valores de PCI do bagaço final (base seca) e biogás produzidos. Esta comparação representa a avaliação das 2 rotas energéticas potenciais propostas:

- Rota 1: rota tradicional de geração de energia - queima do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica (co-geração);
- Rota 2: rota alternativa de geração de energia - produção de metano (biogás) através de tecnologia de biodigestão anaeróbia específica, e posterior queima do bagaço de cana-de-açúcar, para geração de energia elétrica.

A comparação entre as rotas é feita considerando-se cada ciclo válido em separado, as diferentes variedades de cana processadas, bem como uma avaliação geral.

Tabela 5.34 – Balanço energético das rotas propostas (Base Seca) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa)

Rota tradicional de geração de energia (Rota 1)			Rota alternativa de geração de energia (Rota 2)					
Substrato	PCI bagaço seco (kcal / kg bagaço seco)	PCI bagaço seco - geral (kcal / kg bagaço seco)**	Substrato (ciclo)	PCI bagaço seco - por ciclo (kcal / kg bagaço seco)	PCI biogás - por ciclo (kcal / kg bagaço seco)	PCI TOTAL (kcal / kg bagaço seco)	PCI TOTAL por variedade de cana (kcal / kg bagaço seco)**	PCI TOTAL geral (kcal / kg bagaço seco)**
Bagaço Novo 1*	4097,33		Ciclo 01	4.647,39	44,91	4692,30	4758,95	
			Ciclo 02	4.797,53	28,07	4825,60		
			Ciclo 03	4.326,00	16,84	4342,84		
Bagaço Novo 2	4201,45	4061,66	Ciclo 04	4.193,98	35,93	4229,91	4255,34	4203,03
			Ciclo 05	4.205,08	8,98	4214,06		
			Ciclo 06	4.221,06	13,47	4234,53		
Bagaço Novo 3	3886,20		Ciclo 07	3.689,26	14,60	3703,86	3542,51	
			Ciclo 08	3.366,56	14,60	3381,16		

* PCI calculado a partir da média entre a energia bruta obtida para o Bagaço Novo 1b, Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3

** Valor médio obtido

PCI TOTAL: soma do poder calorífico do biogás + bagaço

A tabela 5.35 apresenta, para a Rota 2, o percentual do poder calorífico do bagaço processado e do biogás, em relação ao poder calorífico total, por ciclo de processo.

Tabela 5.35 – Percentual do poder calorífico referente ao bagaço seco (base seca) e biogás produzidos na Rota 2

Ciclo válido	Percentual do PCI do bagaço em relação ao PCI total	Percentual do PCI do biogás em relação ao PCI total
Ciclo 01	99,04 %	0,96 %
Ciclo 02	99,42 %	0,58 %
Ciclo 03	99,61 %	0,39 %
Ciclo 04	99,15 %	0,85 %
Ciclo 05	99,79 %	0,21 %
Ciclo 06	99,68 %	0,32 %
Ciclo 07	99,61 %	0,39 %
Ciclo 08	99,57 %	0,43 %

Adicionalmente, complementando o balanço energético das tabelas 3.34 e 3.35, a tabela 5.36 apresenta o balanço energético em termos de “kcal total” por ciclo válido, não sendo considerados, neste caso, os valores em kcal/kg bagaço.

Tabela 5.36 – Balanço energético das rotas propostas (Base Seca) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa) – em termos de energia TOTAL disponível (kcal total)

Ciclo	PCI Rota 1 (bagaço) kcal total	PCI Rota 2 (bagaço + biogás) kcal total	Variação PCI (%)*	PCI biogás na Rota 2 (%)
Ciclo 01	61459,95	63134,57	2,72	1,07
Ciclo 02	68999,04	63512,24	-7,95	0,74
Ciclo 03	73441,35	58046,46	-20,96	0,51
Ciclo 04	39535,64	36909,61	-6,64	0,92
Ciclo 05	53190,36	48598,26	-8,63	0,23
Ciclo 06	49745,17	40766,08	-18,05	0,39
Ciclo 07	57321,45	45371,89	-20,85	0,47
Ciclo 08	50170,84	35773,03	-28,70	0,53

* Variação da Rota 2 em relação à Rota 1.

Avaliando-se o balanço energético das Rotas 1 e 2, percebe-se que, em virtude da reduzida produção de biogás (metano acumulado) em termos de volume, o que acarreta em um PCI reduzido para o biogás total produzido (kcal/kg bagaço seco), o PCI do bagaço inicial e final adquire uma importância mais significativa no balanço energético.

Em termos de energia total disponível (kcal total), observa-se que as variações de PCI menos negativas e/ou mais positivas corresponderam aos ciclos com melhor desempenho operacional.

Deve ser lembrado que os valores acima foram calculados para o bagaço em base seca, o que aumenta os valores do seu poder calorífico.

5.2.3.2 – Balanço energético na Condição 2: bagaço de cana em base úmida

A tabela 5.37 apresenta a comparação entre os valores de PCI das amostras de bagaço novo e do somatório dos valores de PCI do bagaço final (base úmida) e biogás produzidos. Esta comparação representa a avaliação das 2 rotas energéticas potenciais propostas:

- Rota 1: rota tradicional de geração de energia - queima do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica (co-geração);

- Rota 2: rota alternativa de geração de energia - produção de metano (biogás) através de tecnologia de biodigestão anaeróbia específica, e posterior queima do bagaço de cana-de-açúcar, para geração de energia elétrica.

A comparação entre as rotas é feita considerando-se cada ciclo válido em separado, as diferentes variedades de cana processadas, bem como uma avaliação geral.

Observa-se que os valores de PCI do bagaço úmido e do biogás são expressos por quilograma de bagaço úmido processado.

A umidade do bagaço inicial (cálculos para a Rota 1) foi considerada como 50%. A umidade do bagaço processado na planta piloto (cálculos para a Rota 2) foi considerada como 60%.

Tabela 5.37 – Balanço energético das rotas propostas (Base Úmida) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa)

Rota tradicional de geração de energia (Rota 1)			Rota alternativa de geração de energia (Rota 2)					
Substrato	PCI bagaço úmido – 50% (kcal / kg bagaço úmido)	PCI bagaço úmido – 50% - geral (kcal / kg bagaço úmido) ⁽²⁾	Substrato (ciclo)	PCI bagaço úmido – 60% - por ciclo (kcal / kg bagaço úmido)	PCI biogás – por ciclo (kcal / kg bagaço úmido)	PCI TOTAL (kcal / kg bagaço úmido)	PCI TOTAL por variedade de cana (kcal / kg bagaço úmido) ⁽²⁾	PCI TOTAL geral (kcal / kg bagaço úmido) ⁽²⁾
Bagaço Novo 1 ⁽¹⁾	1653,65	1635,81	Ciclo 01	1432,67	21,33	1454,00	1480,10	1256,44
			Ciclo 02	1492,72	13,47	1506,19		
			Ciclo 03	1304,11	7,86	1311,97		
Bagaço Novo 2	1705,7		Ciclo 04	1251,31	15,72	1267,03	1277,03	
			Ciclo 05	1255,74	4,49	1260,23		
			Ciclo 06	1262,14	6,74	1268,88		
Bagaço Novo 3	1548,08		Ciclo 07	1049,42	6,74	1056,16	991,62	
			Ciclo 08	920,34	6,74	927,08		

(1) PCI calculado a partir da média entre a energia bruta obtida para o Bagaço Novo 1b, Bagaço Novo 2 e Bagaço Novo 3

(2) Valor médio obtido

PCI TOTAL: soma do poder calorífico do biogás + bagaço

A tabela 5.38 apresenta, para a Rota 2, o percentual do poder calorífico do bagaço processado e do biogás, em relação ao poder calorífico total, por ciclo de processo.

Tabela 5.38 – Percentual do poder calorífico referente ao bagaço úmido e biogás produzidos (base úmida) na Rota 2

Ciclo válido	Percentual do PCI do bagaço em relação ao PCI total	Percentual do PCI do biogás em relação ao PCI total
Ciclo 01	98,53 %	1,47 %
Ciclo 02	99,11 %	0,89 %
Ciclo 03	99,40 %	0,60 %
Ciclo 04	98,76 %	1,24 %
Ciclo 05	99,64 %	0,36 %
Ciclo 06	99,47 %	0,53 %
Ciclo 07	99,36 %	0,64 %
Ciclo 08	99,27 %	0,73 %

Adicionalmente, complementando o balanço energético das tabelas 3.37 e 3.38, a tabela 5.39 apresenta o balanço energético em termos de “kcal total” por ciclo válido, não sendo considerados, neste caso, os valores em kcal/kg bagaço.

Tabela 5.39 – Balanço energético das rotas propostas (Base Úmida) – Rota 1 (tradicional) e Rota 2 (alternativa) – em termos de energia TOTAL disponível (kcal total)

Ciclo	PCI Rota 1 (bagaço) kcal total	PCI Rota 2 (bagaço + biogás) kcal total	Variação PCI (%)*	PCI biogás na Rota 2 (%)
Ciclo 01	37207,13	31288,06	-15,91	1,53
Ciclo 02	41771,20	31723,20	-24,05	1,07
Ciclo 03	44723,45	28061,88	-37,25	0,73
Ciclo 04	24075,96	17680,16	-26,57	1,26
Ciclo 05	32391,24	23251,16	-28,22	0,37
Ciclo 06	30293,23	19546,56	-35,48	0,61
Ciclo 07	34251,27	20700,96	-39,56	0,72
Ciclo 08	29978,57	15695,31	-47,64	0,83

* Variação da Rota 2 em relação à Rota 1.

Avaliando-se o balanço energético das Rotas 1 e 2, percebe-se que o efeito da umidade do bagaço acarreta em um menor poder calorífico do bagaço inicial e final processado. Conseqüentemente, como a umidade é ainda superior ao final do processo, percebe-se uma maior influência desta umidade na variação do PCI, considerando-se o teor energético total dos ciclos.

Ainda assim, comparando-se o balanço energético das Condições 1 e 2, percebe-se que mesmo considerando-se o bagaço em base úmida, o percentual de energia disponível do biogás gerado é considerado bastante reduzido, em relação ao poder calorífico do bagaço de cana.

A produção reduzida de biogás (metano acumulado) em termos de volume, acarreta em um PCI reduzido para o biogás total produzido (kcal/kg bagaço úmido), fazendo com que o PCI do bagaço inicial e final adquira uma importância mais significativa no balanço energético.

5.3 – Discussão final

Considerando-se o processo operacional para biodigestão do bagaço de cana-de-açúcar no processo Busch e Sieber (2006) da forma como foi praticado, foi verificada a funcionalidade do mesmo, porém com uma geração bastante reduzida de biogás, em termos de volume por quilograma de bagaço processado. O percentual de metano no biogás por vezes se apresentou adequado em termos energéticos, particularmente no início dos ciclos.

Os ciclos contendo resultados mais positivos estão vinculados às amostras de bagaço inicial com maior percentual de brix, ART, competindo desta forma com a própria eficiência do processo de extração de etanol.

Considerando-se as amostras de cana processada, não é possível estabelecer, com segurança, um padrão de comportamento de processo separado por variedade de cana, assim como por percentual de cinzas. Amostras de bagaço de mesma variedade podem ter características diferentes, que podem ser provenientes inclusive da época da colheita e período de acondicionamento da cana antes da moagem. Em relação às cinzas, o rendimento verificado não foi inversamente proporcional ao percentual de cinzas, ou vice-versa.

A produção reduzida de biogás também pode ser confirmada no balanço de massa e cálculo do PCI entre o bagaço inicial e final (após processamento na planta piloto). A redução considerada insignificante do PCI no bagaço final, demonstra que ainda existe um grande potencial de geração de energia que não foi biodegradado: no caso em questão, as fibras presentes no substrato.

As fibras constituintes do bagaço, as quais possuem biodegradabilidade limitada, também são consideradas como parte integrante da matéria orgânica seca – MOS do bagaço. Desta maneira, alguns parâmetros de processo como volume de biogás por quilograma de MOS, e metano acumulado por quilograma de MOS, foram contabilizados com uma parte do substrato que não se degradou, ou seja, apresentaram um pior desempenho em virtude da contabilização das fibras no parâmetro MOS.

O percentual reduzido de matéria orgânica biodegradável presente na matéria orgânica seca – MOS, remete à necessidade de otimização da produção de biogás e geração de energia para o bagaço de cana. Esta otimização poderá ser alcançada após a implementação de algumas medidas, como a implementação de pré-tratamento(s) no bagaço de cana de açúcar a ser processado, visando o aumento da degradabilidade das fibras presentes. Posteriormente, para o biogás gerado, deve ser considerada a hipótese de sua purificação (*greengas*).

Considerando-se o processamento do bagaço na planta piloto, em relação às taxas de circulação de solução aplicadas neste estudo para o reator anaeróbio, uma vez identificada a presença de bagaço de cana ácido, uma alternativa a ser testada é o emprego, a princípio, das 2 (duas) taxas de circulação mencionadas. Neste caso, o parâmetro acidez do bagaço deve ser determinado anteriormente ao seu processamento. Caso seja verificada esta acidez, a taxa de circulação deve ser reduzida, em princípio, para 2 L por kg MOS por dia. Caso não seja verificada uma acidez mais acentuada no bagaço a ser processado, a taxa, em princípio, pode ser mantida uma taxa mais elevada (em princípio, a vazão sugerida de 7 L por kg MOS por dia). Observa-se que ao final de todos os ciclos, o pH de ambos os estágios apresenta uma elevação, de forma que o próximo ciclo a ser iniciado não terá influência de um possível ciclo “ácido” anterior.

Grande parte das melhorias de processo a serem implementadas, tais como definição das taxas de circulação ideais e volume ideal de solução circulante, podem ser determinadas somente após simulações de processo exaustivas, preferencialmente com o processamento, em paralelo, de unidades de planta piloto distintas, testando-se diversas condições de processo e com um número estatisticamente representativo de ciclos.

6. CONCLUSÕES

São apresentadas, a seguir, as conclusões obtidas com a pesquisa desenvolvida para a avaliação de rota de geração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar pela biodigestão em duplo estágio e geração de biogás.

- A construção e operação da planta piloto de biodigestão anaeróbia e produção de biogás foram feitas com êxito, conforme a Patente de Busch & Sieber (2006). Foi possível operar a planta com regularidade, sendo obtido biogás como produto.
- A partir da operação da planta piloto conforme Busch & Sieber (2006), foi possível compreender e verificar os seus protocolos de funcionamento, bem como suas limitações de processo, principalmente relacionadas às taxas de circulação ideais para cada tipo de substrato, permitindo o conhecimento necessário para uma otimização operacional em termos de produção de biogás, particularmente considerando-se o substrato processado.
- A tecnologia proposta por Busch & Sieber (2006) foi aplicada para o substrato bagaço de cana-de-açúcar, com a produção de biogás. Com o funcionamento da planta piloto para o bagaço de cana, foi possível a verificação dos protocolos de funcionamento do aparato experimental considerando-se as limitações deste substrato. A produção de biogás foi verificada principalmente nos primeiros dias de cada ciclo de processo, onde foi verificada uma maior taxa de produção de metano.
- A partir dos resultados obtidos com a operação da planta piloto foram obtidas curvas típicas e correlações entre os diversos parâmetros medidos no processo. Com a obtenção destas curvas e correlações foi possível o controle e o entendimento operacional do processo, permitindo os ajustes operacionais necessários e a determinação do momento de finalização de cada ciclo. Foi possível ainda o acompanhamento diário da funcionalidade e eficácia do processo como um todo.
- Foi determinado o potencial de geração de energia do biogás gerado. Apesar de ter sido produzido biogás, esta produção não foi suficientemente elevada para se produzir um potencial de energia elevado, o que pode ser atribuído à restrita biodegradabilidade das fibras presentes no bagaço.
- Foi determinado o poder calorífico inferior – PCI do bagaço de cana-de-açúcar gerado diretamente na Usina (não digerido), e do bagaço de cana após o processo de biodigestão anaeróbia. Os valores de PCI foram determinados tanto para o bagaço em

base seca, como em base úmida. Considerando-se os valores de PCI determinados, não houve variações significativas no PCI do bagaço após a biodigestão, sendo que o maior percentual de energia disponível neste substrato é proveniente das fibras remanescentes.

- A comparação e avaliação do potencial de geração de energia foi feito para as 2 rotas de processo, em 2 condições distintas: bagaço em base seca e base úmida. Nestas 2 condições, e de acordo com a avaliação do potencial de geração de energia para as 2 rotas de processo, em termos quantitativos, ambas as rotas não apresentam uma alteração significativa dos valores totais de PCI. Em termos qualitativos, o percentual de geração de biogás, em termos energéticos, é bastante reduzido em relação ao potencial de energia, considerando-se o bagaço de cana, considerando-se a unidade de massa de bagaço. No entanto, a produção de biogás pode passar a ser considerada mais significativa caso venha a ser processada uma quantidade elevada de bagaço de cana, considerando-se que a produção de bagaço nas Usinas pode chegar a alguns milhares de toneladas por dia.

7. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

A tecnologia de biodigestão em duplo estágio de Busch & Sieber (2006) foi utilizada para o processamento do bagaço de cana-de-açúcar “*in natura*”, tal qual é gerado nas usinas sucroalcooleiras. Este processamento permitiu obter uma operação da planta piloto que pode ser considerada de “background” para o bagaço de cana, sem a implementação de adequações de processo bem como a implementação de pré-tratamento no bagaço de cana.

O percentual reduzido de matéria orgânica biodegradável presente na matéria orgânica seca – MOS, remete à necessidade de otimização da produção de biogás e geração de energia para o bagaço de cana. Esta otimização poderá ser alcançada após a implementação de algumas medidas, a saber:

- Implementação de pré-tratamento(s) no bagaço de cana-de-açúcar a ser processado, visando o aumento da degradabilidade das fibras presentes. Poderão ser estudados e adotados tratamentos térmicos, físicos, químicos e biológicos. No entanto, deve-se ter o cuidado de se adotar um processo específico, compatível ao processo Busch e Sieber (2006), sem prejuízo deste, uma vez que no mesmo não há adição de produtos químicos na solução circulante.
- Considerando-se os pré-tratamentos disponíveis, recomenda-se, como ponto de partida inicial, a aplicação do pré-tratamento relatado e investigado por Teixeira et al. (1999), com o uso de ácido peracético e/ou mistura deste mesmo ácido e NaOH.
- Ao se implementar o pré-tratamento do bagaço, deve ser avaliado o novo balanço de massa final do processo e as conseqüências para o processo biológico. A degradação das fibras irá modificar a estrutura química do bagaço, havendo a possibilidade de conversão bastante significativa deste substrato em biogás, não restando substrato em quantidade significativa para queima em forno rotativo.
- Para o biogás gerado, deve ser considerada a hipótese de sua purificação (*greengas*).
- Pode ser pesquisada e implementada a tecnologia da co-digestão (Mata-Alvarez, 2000), a qual constitui-se em uma opção para melhorar o rendimento de digestão de determinados materiais, em processos anaeróbios. Neste processo, ocorre a utilização de um co-substrato, juntamente ao substrato principal, o qual, geralmente, melhora o rendimento da digestão devido à sinergia positiva estabelecida no meio, bem como ao fornecimento de nutrientes em falta no primeiro substrato.

Paralelamente às melhorias mencionadas anteriormente, uma terceira rota de processo que pode ser testada engloba a utilização de bagaço de cana-de-açúcar e da vinhaça, esta última utilizada como solução circulante na planta piloto. A vinhaça, um subproduto da etapa de destilação em usinas sucroalcoólicas, possui elevado teor de matéria orgânica, água, e variável teor de nutrientes (Khanal *et al*, 2008), geralmente com elevada concentração de nitrogênio, potássio e fósforo, sendo comumente utilizada para irrigação e fertilização das áreas de plantio de cana.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata, 1986.

ABNT NBR 10007 - Amostragem de Resíduos Sólidos, 2004.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração – BIG, 2006, dados atualizados em 2010. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/15.htm> > Acesso em setembro/2010.

BATSTONE, D.J., KELLER, J., ANGELIDAKI, I., KALYUZHNYI, S.V., PAVLOSTATHIS, S.G., ROZZI, A., SANDERS, W.T.M., SIEGRIST, H., VAVILIN, V.A. The IWA Anaerobic Digestion Model n°1 (ADM1). *Water Science & Technology*. v. 45, n. 10, p. 65–73, 2002.

BEKKERING, J., BROEKHUIS, A.A., GEMERT, W.J.T. Optimisation of a green gas supply chain – A review. *Bioresource Technology*. n. 101, p. 450 – 456, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Setor sucroalcooleiro - produção de cana, açúcar e álcool. Brasília, DF, 2008. 3 p.

BUEKENS, A. Energy recovery from residual waste by means of anaerobic digestion Technologies. In: CONFERENCE “THE FUTURE OF RESIDUAL WASTE MANAGEMENT IN EUROPE”, 2005, Luxembourg.

BURCHETT, S., MOFFAT, B. Industrial and Commercial End-Users: the Transition from Ratepayer to Customer. In: *The US Power Market: Restructuring and Risk Management*. London: Risk Publications, 1997. cap. 18, p. 272-275.

BUSCH, G.; SIEBER, M. WO 2006/048008 A2. Abbaufverfahren Von Biogenem Material, 2006.

BUSCH, G. Biogas from Biomass and Waste – Fundamentals of the Biogas Process. Brandenburg University of Technology, Chair of Waste Management, 2008.

CARDOSO, Maria das Graças (editado por). Produção de Aguardente de Cana. 2ª Edição, Editora UFLA – Universidade Federal de Lavras, 2006. 445 p.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo / SP. A Produção mais limpa (P + L) no setor sucroalcooleiro – Informações gerais. São Paulo, SP, 2002. 14 p.

CHERNICHARO, C. A. L. . Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Volume 5 - Reatores Anaeróbios. 2ª Edição, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), 2007. v. 5. 379 p.

COELHO, S.T., Mecanismo para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa: um modelo para o Estado de São Paulo. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

CONSECANA – Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. *Manual de Instruções*.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. *Biomassa para energia*. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 732 p.

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. *Laboratório de Análises - Manual de controle químico da fabricação de açúcar*. Cap. 4, 2005.

DELLEPIANE, D.; BOSIO, B.; ARATO, E. Clean energy from sugarcane waste: feasibility study of an innovative application of bagasse and barbojo. *Journal of Power Sources*, n. 122, p. 47-56, 2003.

EPA – U.S. Environmental Protection Agency. *Materials Characterization Paper - In Support of the Final Rulemaking: Identification of Nonhazardous Secondary Materials That Are Solid Waste Biomass - Animal Manure and Gaseous Fuels*, fevereiro/2011. Disponível em < <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/define/pdfs/biomass-manure-final.pdf> >. Acesso em maio/2011.

EPA – U.S. Environmental Protection Agency. *Coal Mine Methane Recovery: A Primer - EPA-430-R-09-013*, setembro/2009. Disponível em < http://www.epa.gov/cmop/docs/cmm_primer.pdf > Acesso em setembro/2010.

FIGUEIREDO, N.J.V. Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso. São Paulo, 2007. Trabalho de Monografia apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

GOERING, H. K., VAN SOEST, P. J. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). *Agric. Handbook 379*. ARS, USDA, Washington, DC. 1970.

GRANER, et al., *Agricultura – Vol.I*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz – ESALQ/USP, Piracicaba/SP, 1973.

GUNASEELAN, V.N. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a Review. *Biomass and Bioenergy*. v. 13, n. 1/2, p. 83 – 114, 1997.

HENDRIKS, A.T.W.M., ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. v. 100, p. 10–18, 2009.

HOLM-NIELSEN, J.B., SEADI, T.A., OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*. v. 100, p. 5478 – 5484, 2009.

HOBSON, P.N., FEILDEN, N.E.H. Production and use of biogas in agriculture. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 8, Issue 2., p. 123 – 135, 1982.

IGONI, A.H., AYOTAMUNO, M.J., EZE, C.L., OGAJI, S.O.T., PROBERT, S.D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*. v. 85, p. 430 – 438, 2008.

JENKINS, B.M. Fuel properties for biomass materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION AND MANAGEMENT OF ENERGY IN AGRICULTURE: THE ROLE OF BIOMASS, 1990, Delphi. apud CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. Biomassa para energia. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 732p.

KAPARAJU, P., BUENDIA, I., ELLEGAARD, L., ANGELIDAKIA, I.. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*. v. 99, p. 4919–4928, 2008.

KARIM, K., HOFFMANN, R., KLASSON, K.T., AL-DAHMAN, M.H.. Anaerobic digestion of animal waste: effect of mode of mixing. *Water Research*. n° 39, p. 3597–3606, 2005

KHANAL, S.K.; RASMUSSEN, M.; SHRESTHA, P.; VAN LEEUWEN, H.; VISVANATHAN, C.; LIU, H. Bioenergy and biofuel production from wastes / residues of emerging biofuel industries. *Water Environmental Research*, v. 80, n. 10, p. 1625 – 1647, 2008.

LEITE, V.D., SOUSA, J.T., PRASAD, S., LOPES, W.S., JUNIOR, G.B.A., DANTAS, A.M.M. Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbio de batelada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 7, n. 2, p. 318 – 322, 2003.

LEVENSPIEL, O. Engenharia das Reações Químicas. Tradução da 3ª edição americana. Departamento de Engenharia Química, Oregon State University. 2000.

LIBÂNIO, P.A.C. *Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume*. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Belo Horizonte, 2002.

MATA-ALVAREZ, J., MACÉ, S., LIABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*. v. 74, p. 3 – 16, 2000.

MATTOS IL. *Determinação sequencial de frutose e glicose em materiais de relevância agroindustrial empregando sistemas de análise por injeção em fluxo*. Piracicaba, 98p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1991.

MORAES, E.H.B.K. *Ensilagem de gramíneas tropicais*. Trabalho apresentado à disciplina ZOO 650 – Forragicultura, na Universidade Federal de Viçosa - Centro de Ciências Agrárias / Departamento de Zootecnia. Viçosa, 2002.

MOTA, S. Introdução à Engenharia Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1ª edição, 292 p. Rio de Janeiro, 1997.

MURRAY, E.P., TSAI, T., BARNETT, S.A., 1999. A direct methane fuel cell with a ceria-based anode. *Letters to Nature*. N° 400, p. 649 – 651.

NASKEO ENVIRONNEMENT. (2009). Biogas composition. Retrieved from http://www.biogas-renewableenergy.info/biogas_composition.html

ODDONE, D. C. *Cogeração: uma alternativa para produção de eletricidade*. 2002. Tese (Doutorado em Energia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PANDEY, A. et al. Biotechnological potential of agro-industrial residues I: sugarcane bagasse. Departamento de Engenharia Química / Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, Brasil, 2000.

PAOLIELLO, José Maria Morandini. *Aspectos Ambientais e Potencial Energético no Aproveitamento de Resíduos da Indústria Sucroalcooleira*. 2006. 200 p. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

PARAWIRA, W., MURTO, M., READ, J.S., MATTIASSON, B.. A study of two-stage anaerobic digestion of solid potato waste using reactors under mesophilic and thermophilic conditions. *Environmental Technology*. v. 28, p. 1205–1216. 2007.

POKALSKY, J., ROBINSON, J. Integrating Physical and Financial OTC Contract Portfólios. In: *The US Power Market: Restructuring and Risk Management*. London: Risk Publications, 1997. cap. 8, p. 112-115.

PROCHNOW, A., HEIERMANN, M., PLÖCHL, M., LINKE, B., IDLER, C., AMON, T., HOBBS, P.J. Bioenergy from permanent grassland – A review: 1. Biogas. *Bioresource Technology*. n. 100, p. 4931 – 4944. 2009.

RAO, P.V., BARAL, S.S., DEY, R., MUTNURI, S. Biogás generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in Índia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 931. 9p., 2010.

SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of Biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, n 33, p. 1101 – 1107, 2009.

SANTOS, T.M.B; JUNIOR, J.L.; SILVA, F.M.. Avaliação do desempenho de um aquecedor para aves adaptado para utilizar biogás como combustível. *Engenharia. Agrícola*, v.27, n.3, p.658-664. Jaboticabal, set./dez.2007.

SCARAMUCCI, J.A.; PERIN, C.; PULINO, P.; BORDONI, O.F.J.G.; CUNHA, M.P.; CORTEZ, L.A.B. Energy from sugarcane bagasse under electricity rationing in Brazil: a computable general equilibrium model. *Energy Police*, n. 34, p. 986-992, 2006.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.S.; CIMA, F.M.; MACHADO, G. Indicators for sustainable energy development: Brazil's case study. *Natural Resources Forum*, n.29, p. 284-297, 2005.

SILVA, A; GOMES, W.; ALSINA, O. *Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos*. Departamento de Química / Universidade Federal da Paraíba e Unidade Acadêmica de Engenharia Química / Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil, 2007.

SILVEIRA, César. *A construção de um reator duplo estágio para a produção de biogás - Descrição de métodos, materiais e sistemas*. 2008. 29 f. Relatório Final de Iniciação Científica – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SOCOL, C.R.; VANDENBERGHE, L.P.S. Overview of applied solid-state fermentation in Brazil. *Biochemical Engineering Journal*, n.13, p. 205-218, 2003.

SOUZA, Z.J.; AZEVEDO, P.F. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. *RER*, Rio de Janeiro, v. 44, n. 02, p. 179-199, 2006.

TEIXEIRA, L.C., LINDEN, J.C., SCHROEDER, H.A., 1999. Alkaline and peracetic acid pretreatments of biomass for ethanol production. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. v. 77, p. 19 – 34.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo / SP. BIOGÁS, 2009. Disponível em: < <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/default.asp> > Acesso em abril/2009.

COGEN PORTUGAL - Associação Portuguesa para a Eficiência Energética e Promoção da Co-geração, 2010. Disponível em: < <http://www.cogenportugal.com> >

COPERSUCAR - Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, 2010. Disponível em http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana_acucar.asp.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2010. Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/Abertura.html>

LANDTEC, 2010. Manual CDM Biogás. Disponível em < <http://www.landtecsa.com/uploads/products/6/downloads/BioGas.Check%20Manual.pdf> >

UNICA - União da Indústria de Cana-de-açúcar, e MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Cana-de-açúcar processada pelas Usinas Brasileiras, 2009. Disponível em < <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/> >

SINDASUCAR – Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool no Estado de Pernambuco, 2010. Disponível em < <http://www.sindacucar.com.br/?acao=acucar> >.