

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DHYAN MONDUCCI CAVEDAGNE BARBOSA SIMÃO DE OLIVEIRA
THALES STEVEN CERQUEIRA MACÁRIO

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA INCORPORAÇÃO DE UM
SISTEMA DE COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA
CERVEJEIRA**

Prof. Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boly

Rio de Janeiro
Maio 2019

DHYAN MONDUCCI CAVEDAGNE BARBOSA SIMÃO DE OLIVEIRA
THALES STEVEN CERQUEIRA MACÁRIO

ANÁLISE ENERGÉTICA DA INCORPORAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boly

Rio de Janeiro

Mai 2019

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

- O48 Oliveira, Dhyan Monducci Cavedagn Barbosa Simão
Análise energética da incorporação de um sistema de
cogeração em uma indústria cervejeira / Dhyan Monducci
Cavedagne Oliveira Barbosa Simão [e] Thales Steven Cerqueira
Macário. — Rio de Janeiro, 2019.
109f. + anexo: il. (algumas. Color) ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.
Bibliografia : f. 101-106
Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boly
1. Engenharia mecânica. 2. Resíduos vegetais. 3.
Aproveitamento energético. 4. Malte. I. Macário, Thales Steven
Cerqueira. II. Boly, Ronney Arismel Mancebo (Orient.). III. Título.
- CDD 620.1

DHYAN MONDUCCI CAVEDAGNE BARBOSA SIMÃO DE OLIVEIRA
THALES STEVEN CERQUEIRA MACÁRIO

ANÁLISE ENERGÉTICA DA INCORPORAÇÃO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Projeto Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecânica.

Rio de Janeiro, _____ de _____ de _____.

Aprovado por:

Prof. Ronney Arismel Mancebo Boloy, D.Sc. – CEFET/RJ

Prof. Alexandre Silva de Lima, D.Sc. – CEFET/RJ

Prof. Gisele Maria Ribeiro Vieira, D.Sc – CEFET/RJ

Aos nossos pais, irmãos e namoradas por simplesmente existirem em nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos de Dhyan Monducci Cavedagne Barbosa Simão De Oliveira:

À minha família, José Barbosa, Adriana Monducci e Lila Cavedagne, que durante todos esses anos formaram uma base forte e investiram tempo e atenção pra que pudesse viver esse momento

À todos os mestres que passaram em minha vida e foram responsáveis por construir pouco a pouco o conhecimento necessário para cursar engenharia mecânica e, posteriormente, concluí-la com êxito. Em especial ao professor Ronney Boloy por todo o conhecimento compartilhado como orientado e o Professor Hilário Rodrigues, que foi muito mais que um professor de física - de vida também - na graduação, tornando-se um amigo pessoal.

Aos meus amigos do CEFET

À Associação Atlética Acadêmica CEFET/RJ por todos os desafios que me proporcionou enquanto seu membro e adepto, agregando valor às minhas habilidades sociais e emocionais, sendo o principal vetor da minha transformação como ser humano nesses anos de graduação como aluno de Engenharia Mecânica. Não posso esquecer, jamais, os amigos proporcionados por ela, não poderia pedir outros amigos durante a minha passagem como universitário.

Ao meu amigo e dupla de projeto Thales Macário, que dividiu os mesmos sonhos e vontade que eu desde o início da faculdade, compartilhando das mesmas histórias, angústias e senso de humor. Não poderia ser outra a minha dupla de projeto final pra encerrar com “chave de ouro” esse ciclo. Obrigado, amigo, por todos esses anos de universitários bem vividos.

Agradecimentos de Thales Steven Cerqueira Macário:

Aos meus pais, Neuza e Luiz Cláudio Macário, por acreditarem em mim todos esses anos e apostarem inúmeras vezes no meu potencial.

Ao meu irmão Cesar Willian por ser um ponto de apoio e meu fiel ouvinte e companheiro quando tudo parecia perdido.

À Bruna Salvatti, por acreditar demais no meu potencial nunca me deixando desistir, sempre me sacudindo, dando suporte e carinho quando necessário.

Sou grato ao meu professor orientador Ronney Boloy por assumir este projeto e ter paciência em nos orientar em todas as nossas necessidades.

Agradeço a todos os meus colegas de faculdade, em especial à minha amiga Thatyana Magalhães, por ser a responsável por eu ter conhecido a Bruna e ter sido a primeira pessoa que pude contar nessa jornada.

Ao CEFET/RJ, por ser peça chave no meu desenvolvimento profissional desde os meus 16 anos. Tudo que pude viver como aluno nessa instituição desde o ensino técnico me faz ser eternamente grato e feliz por ter vivido tantos momentos memoráveis nessa instituição.

À Atlética CEFET/RJ por ser um dos locais que me fez amar ainda mais o CEFET/RJ e também me desenvolveu tanto profissional quanto pessoalmente.

Aos meus professores do departamento de Engenharia Mecânica por todo ensinamento, paciência e por compartilharem seus conhecimentos.

Aos Amigos que fiz durante minhas trajetórias profissionais que sempre me ajudavam a enfrentar os percalços da vida

À minha dupla Dhyan Monducci por ter embarcado nessa viagem comigo.

*Melhor você organizar bem o seu tempo,
porque vai precisá-lo em dobro.*

Emerson Natal

RESUMO

No atual cenário energético mundial, observa-se um compromisso com a busca de uma melhor gestão no uso da energia, além de processos menos nocivos ambientalmente. A demanda pelo aumento da eficiência energética de processos e redução da quantidade de rejeitos tem se tornado uma realidade no setor industrial brasileiro. Embora existam diversas indústrias distribuídas em vários setores, como o setor agropecuário, com potencial para aproveitamento energético de seus resíduos, ainda há necessidade de incentivar novos setores, como o setor de alimentos e bebidas para aplicação de tecnologias que permitam o aproveitamento energético de seus resíduos. Este projeto tem por objetivo analisar energeticamente, segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, a planta de cogeração de uma grande cervejaria localizada no Estado do Rio de Janeiro. Balanço de massa e energia foram desenvolvidos na planta quando alimentada pelo biogás gerado do bagaço de malte, cujos resultados obtidos a partir dos balanços foram comparados com dados obtidos da planta operando nas condições atuais (alimentada com gás natural). Como resultados, mostram-se os benefícios em parâmetros de desempenho energético, a planta alimentada com biogás alcança a mesma eficiência global de 35% quando operada por Gás Natural e consegue ser autossuficiente nos meses de Janeiro, Novembro e Dezembro, porém gerando uma economia de 4% da energia gasta nos compressores e possibilitando uma redução de 66% do Gás Natural, permitindo a planta operar com autossuficiência energética quando alimentada com Biogás nos meses de alta produção cervejeira. Finalmente pode-se dizer que o presente trabalho permite agregar valor aos resíduos obtidos no setor de alimentos e bebidas, produzindo um biocombustível, neste caso, biogás a partir do resíduo bagaço de malte contribuindo para geração de energia em forma de cogeração, bem como com maior geração de emprego e renda e melhores indicadores de desempenho energético, incidindo em possíveis reduções de custos dos produtos disponibilizados no mercado pela planta e também com possíveis reduções na emissão de gases efeito estufa considerando o ciclo de carbono.

Palavras-chave: Bagaço de malte, Biomassa, Cogeração, Análise Energética.

ABSTRACT

In the current world energy scenario, there is a commitment to the search for better management in energy use, as well as less environmentally harmful processes. The demand for increasing process energy efficiency and reducing the amount of waste has become a reality in the Brazilian industrial sector. Although there are several industries distributed in various sectors, such as the agricultural sector, with potential for energy utilization of their waste, there is still a need to encourage new sectors, such as the food and beverage sector to apply technologies that enable the energy utilization of their waste. . This project aims to analyze energetically, according to the First Law of Thermodynamics, the cogeneration plant of a large brewery located in the state of Rio de Janeiro. Mass and energy balances were developed in the plant when fed by malt bagasse generated biogas, whose results obtained from the balances were compared with data obtained from the plant operating under current conditions (fed with natural gas). As a result, the benefits on energy performance parameters are shown, the biogas-fueled plant achieves the same overall efficiency of 35% when operated by Natural Gas and can be self-sufficient in January, November and December, but generating savings of 4% of the energy spent on the compressors and allowing a 66% reduction in Natural Gas, allowing the plant to operate with energy self-sufficiency when fed with Biogas in the high brewing months. Finally it can be said that the present work allows to add value to the residues obtained in the food and beverage sector, producing a biofuel, in this case biogas from the malt bagasse residue contributing to cogeneration energy generation, as well as greater employment and income generation and better energy performance indicators, focusing on possible cost reductions of products available on the market by the plant and also on possible reductions in greenhouse gas emissions considering the carbon cycle.

Key words: Malt cake, Biomass, Cogeneration, Energetic Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Número de Cervejaria por ano no Brasil	21
Figura 3: Resíduos do processo cervejeiro	29
Figura 4: Representação dos minerais presentes no bagaço de malte	32
Figura 5: Fases da Digestão Anaeróbia	36
Figura 6: Curva típica do crescimento bacteriano	38
Figura 7 - Abordagem da Produção Mais Limpa	46
Figura 8: Fluxo Contínuo	56
Figura 9: Diagrama genérico do processo de geração do biogás	57
Figura 10: Diagrama Ts	63
Figura 11: Diagrama Ts do ciclo de Brayton	64
Figura 12: Esquematização do Ciclo Brayton, à esquerda. Diagrama PV, à direita.	65
Figura 13: Constituição Ciclo Brayton	66
Figura 14: Geração de Vapor	68
Figura 15: Consumo de Energia Elétrica	69
Figura 16: Geração de Vapor e Consumo de Energia Elétrica	70
Figura 17: Visão Geral do Processo	79
Figura 18: Representação do Compressor	81
Figura 19: Representação da Câmara de Combustão	82
Figura 20: Representação da Turbina	82
Figura 21: Representação da Caldeira	83
Figura 22: Representação do termo economizador	83
Figura 233: Representação da Bomba	84
Figura 24: Vazão mássica de Gás Natural	92
Figura 25: Potência no Compressor	93
Figura 26: Relações de economia de Gás Natural e Energia dedicada para compressão do ar	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga orgânica potencial de cada etapa do processo produtivo da cerveja	28
Tabela 2 - Principais componentes do biogás gerado em digestores anaeróbios.....	37
Tabela 3 - Características da produção limpa	44
Tabela 4 - Produção Limpa X Emissões Zero	48
Tabela 5 - Características do biogás	53
Tabela 6 - Geração média do Bagaço de Malte diária mensalmente de 2015 até 2017	72
Tabela 7 - Porcentagem de Metano e Dióxido de Carbono no Biogás oriundo do Sub Produto Cervejeiro	75
Tabela 8 - Massa molar dos gases envolvidos no processo de combustão.....	76
Tabela 9 - Poder calorífico do Biogás em função da concentração (%) de metano ..	78
Tabela 10 - Modelagem da Tabela Dinâmica.....	80
Tabela 11 – Modelagem da Tabela Dinâmica	84
Tabela 12 – Modelagem da Tabela de Potências e Eficiências Térmicas	86
Tabela 13 - Tabela Termodinâmica.....	87
Tabela 14 - Tabela de Potência e Rendimento	87
Tabela 15 – Modelagem da Tabela Termodinâmica utilizando Biogás	89
Tabela 16 – Incógnitas do sistema de alimentado por biogás.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
h_e	Entalpia específica na entrada do volume de controle [kJ/kg]
h_s	Entalpia específica na saída do volume de controle [kJ/kg]
\dot{m}_e	Fluxo de massa na entrada do volume de controle [kg/s]
\dot{m}_s	Fluxo de massa na saída do volume de controle [kg/s]
η	Eficiência
Q	Calor [kJ]
\dot{Q}_{vc}	Taxa de calor para o volume de controle [kW]
Ton	Tonelada
V_e	Velocidade na entrada [m/s]
V_s	Velocidade na saída [m/s]
W	Trabalho [kJ]
\dot{W}_{vc}	Trabalho ou potência, por unidade de tempo, referente ao volume de controle [kW]
z_e	Altura potencial na entrada [m]
z_s	Altura potencial na saída [m]

LISTA DE SÍMBOLOS

C_4H_6	Etilacetileno
CH_4	Metano
CH_3COOH	Ácido Acético
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de carbono
$(CH_3)_3N$	Trimetilamina
H_2	Hidrogênio
H_2O	Água
$HCOO^-$	Ácido fórmico menos um íon hidrogênio
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kJ	Kilojoule
kPa	Kilopascal
kW	Quilowatt
L	Litro
mi hl	Milhões de Hectolitros
MJ	Megajoule
m^3	Metro cúbico
N_2	Nitrogênio
NH_3	Amônia
NO_3	Nitrato
O_2	Oxigênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
SO_4	Sulfato

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Objetivo	22
1.2	Justificativa	22
1.3	Metodologia	23
1.4	Organização do Trabalho	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Processo Cervejeiro	25
2.2	Resíduos do Processo Cervejeiro	27
2.3	A Função do Bagaço de Malte	30
2.4	Digestão Anaeróbia	33
2.4.1	Cinética da Digestão Anaeróbia	37
2.4.2	Reatores Anaeróbios	39
2.4.3	Despejos Passíveis de Serem Tratados por Via Anaeróbia	40
2.4.4	Características dos Processos Anaeróbios	41
2.5	Desafios da Gestão Ambiental	41
2.5.1	Produção Eficiente.....	44
2.5.2	Ecoeficiência	45
2.5.3	O Conceito de Emissões Zero	47
2.6	O Biogás.....	49
2.6.1	Benefícios do biogás	52
2.7	Biodigestor.....	53
2.7.1	Teor de matéria seca.....	54
2.7.2	Tipo de Alimentação no Biodigestor	55
2.7.3	Contínua e Semicontínua	55
2.7.4	Fluxo Contínuo	55
2.7.5	Fluxo Contínuo com Armazenamento Combinado	56

2.7.6	Alimentação Descontínua.....	56
2.7.7	Modo de processamento	56
2.7.8	Tipos de Biodigestor	58
2.7.9	Processo com Mistura Completa	58
2.7.10	Fluxo Pistonado.....	58
2.7.11	Tratamento em Batelada	59
2.7.12	Estrutura dos Biodigestores.....	59
2.7.13	Mistura e Equipamentos de Agitação	60
2.8	Eficiência da Primeira Lei da Termodinâmica.....	61
2.9	Ciclo Brayton	64
3	ESTUDO DE CASO.....	66
3.1	Demandas	68
3.2	Produção do Bagaço de Malte	70
3.2.1	Obtenção do Bagaço de Malte	70
3.2.2	Beneficiamento do Malte	70
3.2.3	Brassagem	71
3.3	Caracterização dos Gases	74
3.3.1	Estequiometria dos Gases de Combustão	74
3.3.2	Equações de Combustão	76
3.3.3	Poder Calorífico.....	77
3.4	Usina de Cogeração.....	78
3.4.1	Balanços de Massa e Energia aplicado aos Volumes de Controle.....	81
3.4.2	Eficiência Térmica	85
4	RESULTADOS	86
4.1	Gás Natural	86
4.2	Biogás.....	88
5	CONCLUSÃO.....	95

6	FUTUROS TRABALHOS.....	95
	REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

A utilização da biomassa como fonte de energia elétrica tem sido crescente no Brasil, principalmente em sistemas de cogeração (pela qual é possível obter energia térmica e elétrica) dos setores produtivos.

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis.

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos.

A pequena utilização e a imprecisão na quantificação são decorrências de uma série de fatores. Um deles é a dispersão da matéria-prima – qualquer galho de árvore pode ser considerado biomassa, que é definida como matéria orgânica de origem vegetal ou animal passível de ser transformada em energia térmica ou elétrica. Outro é a pulverização do consumo, visto que ela é muito utilizada em unidades de pequeno porte, isoladas e distantes dos grandes centros. Finalmente, um terceiro é a associação deste energético ao desflorestamento e à desertificação – um fato que ocorreu, mas que está bastante atenuado.

Mas, se atualmente a biomassa é uma alternativa energética de vanguarda, historicamente tem sido pouco expressiva na matriz energética mundial. Ao contrário do que ocorre com outras fontes, como carvão, energia hidráulica ou petróleo, não tem sido contabilizada com precisão.

Quanto às técnicas utilizadas para transformar matéria-prima em energético, existem várias. Cada uma dá origem a determinado derivado e está em um nível

diferente do ponto de vista tecnológico. Há, por exemplo, a combustão direta para obtenção do calor. Ela ocorre em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras, para a geração de vapor.

Na gaseificação, por meio de reações termoquímicas que envolvem vapor quente e oxigênio, é possível transformar o combustível sólido em gás (mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio). Este gás pode ser utilizado em motores de combustão interna e em turbinas para geração de eletricidade. Além disso, é possível dele remover os componentes químicos que prejudicam o meio ambiente e a saúde humana – o que transforma a gaseificação em um processo limpo.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (2018), o setor cervejeiro é um dos mais tradicionais do Brasil, criado em 1853, e o país é o terceiro maior produtor de cerveja, perdendo as primeiras posições para a China e para os Estados Unidos.

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2018), no ano 2017 a indústria cervejeira nacional está crescendo ao longo do tempo, sendo legalmente registradas 679 de cervejarias e o total de produtos registrados de cervejarias, cervejas e chopes, chega a 8903 produtos. As cervejarias encontram-se concentradas nas regiões Sul e Sudeste. O estado que possui o maior número de estabelecimentos é o Rio Grande do Sul, sucedido por São Paulo, Minas Gerais, Santa Catarina, Paraná e Rio de Janeiro. As primeiras posições do ranking nacional dos estados com o maior número de cervejarias estão localizadas nas regiões Sul, com 287 estabelecimentos, e Sudeste, com 279.

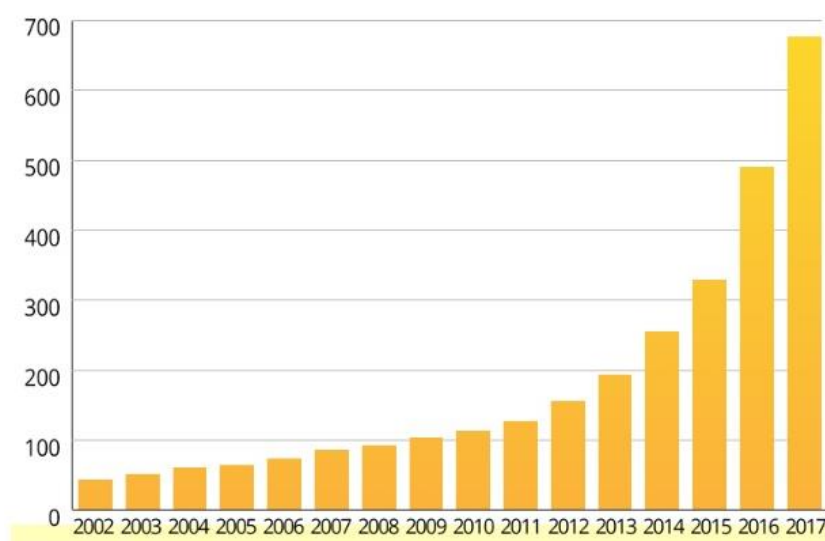


Figura 1: Número de Cervejaria por ano no Brasil

Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2018)

No cenário mundial, a produção de cerveja apresentou um longo período de crescimento, impulsionado pelo aumento do consumo desta bebida em países subdesenvolvidos, entretanto, a partir de 2012 houve uma retração que foi, em grande parte, ocasionada pela desaceleração da economia mundial e a diminuição da produção e consumo dos países desenvolvidos (MARCUSO; MULLER, 2017).

A relação entre a população dos estados e o número de cervejarias, chamada de densidade cervejeira segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2018), é um índice que evidencia a distribuição média de habitantes por cervejarias nos estados. Com base nesse índice, o Rio Grande do Sul também se classifica em primeiro lugar do país, em seguida Santa Catarina e Paraná, sendo assim, a região Sul possui a melhor distribuição nesta relação. Já o estado de São Paulo, por exemplo, que tem a segunda posição no total de cervejarias, ocupa apenas o décimo lugar na densidade cervejeira.

Conforme citado por Marcusso e Muller (2017) a produção mundial atingiu 1,97 bilhões de hectolitros em 2012 e em até 2016 perdeu 20 milhões de hectolitros ficando na casa de 1.95 bilhões de hectolitros. Em relação a produção de cerveja no Brasil observa-se uma tendência crescente nos últimos 30 anos, alcançando o patamar de 140 milhões de hectolitros (mi hl) colocando o Brasil em terceiro lugar no ranking mundial atrás apenas da líder China (460 mi hl) e dos EUA (221 mi hl) e a frente da Alemanha (95 mi hl) e da Rússia (78 mi hl).

1.1 Objetivo

O objetivo principal do presente trabalho é analisar energeticamente, segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, a planta de cogeração de uma grande cervejaria localizada no Estado do Rio de Janeiro alimentada com biogás gerado a partir do aproveitamento energético do bagaço de malte. Para tanto os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos:

- 1- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os processos que existem para produção de cerveja, detalhando o potencial de aproveitamento energético de seus resíduos, principalmente o bagaço de malte. Além disso se discorre sobre processos biológicos como a digestão anaeróbia, utilizado na conversão do resíduo em um biocombustível, neste caso biogás. Realiza-se também uma pesquisa bibliográfica sobre os desafios associados com a gestão ambiental. Posteriormente, aborda-se sobre a produção e uso do biogás do ponto de vista energético. Há também uma pesquisa bibliográfica sobre a aplicação da primeira Lei da termodinâmica em processos térmicos, principalmente na geração de energia elétrica;
- 2- Desenvolver balanços de massa e energia visando o cálculo de parâmetros termodinâmicos e energéticos, que possibilitem caracterizar se a planta proposta alimentada com biogás é viável quando comparada com a planta operando nas condições atuais de alimentação (gás natural).

1.2 Justificativa

Os impactos no meio ambiente devido ao avanço dos processos industriais do mundo desde a sua primeira revolução geraram maior preocupação quanto a uma gestão mais eficiente do uso de energia e a busca por tecnologia que permitam processos mais limpos. Hoje, no Brasil, a indústria agropecuária já faz grande uso dessas inovações e aplicações, todavia o setor de Alimentos e Bebidas tem grande potencial de fazer o mesmo.

A demanda pelo aumento da eficiência energética de processos e redução da quantidade de rejeitos tem se tornado uma realidade no setor industrial brasileiro.

Embora existam diversas indústrias distribuídas em vários setores, como o setor agropecuário, com potencial para aproveitamento energético de seus resíduos, ainda há necessidade de incentivar novos setores, como o setor de alimentos e bebidas para aplicação de tecnologias que permitam o aproveitamento energético de seus resíduos.

1.3 Metodologia

O presente trabalho consiste em analisar a eficiência térmica da planta de cogeração da cervejaria usada como objeto de estudo da forma que é alimentada e sob a hipótese de trocar o combustível utilizado (Gás Natural) para o Biogás, oriundo do potencial processo de decomposição do subproduto cervejeiro, o bagaço de malte, e comparar os resultados obtidos.

Para isso, foram coletados os consumos totais de Energia Elétrica, Vapor e Geração de Bagaço de Malte de cada mês dos anos de 2015 até 2017, de uma cervejaria que atua no Brasil. A partir deles gerou-se um valor médio de consumo de energia elétrica e térmica para os meses de Janeiro a Dezembro e a produção média diária por mês de Bagaço de Malte.

Além dos itens descritos no parágrafo anterior, foram apurados os valores de vazão mássica, temperatura, pressão e entalpia dos fluidos atuantes na usina de cogeração, através dos pressostatos e termostatos conectados no sistema de automação de operação, bem como o manual técnico dos equipamentos.

Como esse trabalho não foi embasado em testes empíricos, os resultados do potencial para a produção de biogás foram obtidos através dos dados encontrados na literatura, tais como: composição química e valor energético.

Posteriormente, realizou-se o balanço estequiométrico da combustão das substâncias usadas como combustíveis e o ar atmosférico seco, considerando a quantidade de excesso de oxigênio necessária para tratar o problema como um caso de combustão completa.

Logo, desenhou-se o diagrama que representa a usina de cogeração, possibilitando o desenvolvimento do balanço de massa e energia em cada equipamento da planta. Por fim foi realizado o cálculo da eficiência térmica, considerando duas situações: 1- Planta operando com gás natural (situação atual); 2- Planta operando com biogás (proposta do presente estudo). Como a geração de biogás não é constante, ou seja,

tem seu consumo médio variando mês a mês devido ao efeito de sazonalidade do mercado cervejeiro, a análise foi realizada para cada um dos valores obtidos por mês

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado em 5 capítulos, sendo apresentada, no primeiro capítulo a introdução do tema, destacando-se: o objetivo, a justificativa, a metodologia utilizada para a realização do trabalho e a forma como é organizado.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica que foi realizada a partir de pesquisas sobre o tema abordado neste trabalho. Esse capítulo contextualiza o leitor em pontos importantes a respeito do tema. Faz a introdução o processo de obtenção dos insumos, pontos necessários para a compreensão a respeito de infraestrutura, mecanismos de reação, conceitos de gestão ambiental e conceitos termodinâmicos para o tratamento dos produtos da biodigestão e seu uso como fonte energética.

O terceiro capítulo apresenta o estudo de caso a partir da obtenção do bagaço de malte, ressaltando a as características de obtenção do mesmo e os processos para a obtenção do biogás para seu uso como matriz energética. É analisada a necessidade de mistura com outros combustíveis para a otimização de seu rendimento em ciclos fechados de potência.

O quarto capítulo analisa, a partir dos resultados obtidos, as conclusões da abordagem e a possibilidade de aplicação dessa metodologia.

O quinto capítulo convida o leitor a realizar, a partir desse trabalho, novas abordagens e dar continuidade a outras visões baseadas nos resultados obtidos nesse estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será tratado nesse capítulo todos os conceitos necessários para se entender os processos de obtenção do bagaço de malte, o potencial de reutilização do mesmo em processos internos da fábrica em questão. Os conceitos envolvem condições específicas da fábrica, características dos rejeitos, princípios científicos para embasamento de raciocínio e características de processos industriais sob o ponto de vista para obtenção de energia.

2.1 Processo Cervejeiro

Em uma primeira ótica, se faz necessário definirmos a raiz do nosso objeto de estudo partindo do produto final até o resíduo objeto para uma melhor compreensão.

A definição de cerveja, malte e mosto de malte são largamente encontrados em publicações sejam acadêmicas ou comerciais. Produção Própria decidiram adotar o conceito da bebida adotado por MADRID em 1996 sendo como “bebida resultante da fermentação, mediante leveduras selecionadas, do mosto procedente do malte de cevada, sozinho ou misturado com outros produtos amiláceos transformáveis em açúcares por digestão enzimática, cozimento, aromatizado com flores de lúpulo, seus extratos e concentrados. Malte são grãos de cevada submetidos à germinação e posterior dissecação e tostagem. O mosto de malte é líquido obtido por meio de tratamento do malte com água potável para extrair os seus princípios solúveis.

O processo de obtenção da cerveja, ou processo cervejeiro segue determinações encontradas na Lei da Pureza alemã (Reinheitsgebot), de 1516 concebida na região da Bavária e define, como parâmetro de pureza a utilização restrita dos ingredientes água, malte e lúpulo para a obtenção de produto (HUIGE,2006). Entretanto, as principais cervejas comercializadas no Brasil utilizam outros cereais não-maltados em sua composição. Abaixo encontra-se uma figura-resumo sobre o fluxo de fabricação envolvendo os estágios mais importantes.

O descritivo do processo de produção clássico da cerveja é estratificado em diferentes pontos:

- Obtenção do malte a partir da cevada
- Mosturação
- Fermentação e maturação
- Pasteurização

- Envase

Para a obtenção do malte, estoca-se a cevada em silos e ocorre o transporte para complexos de limpeza e discriminação, onde ocorre a retirada das impurezas. Ocorre a submersão em reservatórios de água durante um período de quarenta a sessenta horas.

Após esse período, a cevada encharcada é levada para cilindros de germinação e, posteriormente, para torres de secagem e maltagem. O ar, flui, aquecido com o objetivo de conter a germinação diminuindo a umidade de uma faixa de aproximadamente 44% para um teor próximo a 4%. Esse processo ocorre nas ditas “Maltarias”, que no caso de uma grande cervejaria localizada na zona oeste do Rio de Janeiro, encontram-se em localidades diferentes das plantas cervejeiras.

Nas plantas Cervejeiras, ocorre a trituração e mistura do produto malte e obtém-se um produto de consistência pastosa que sofre mais um processo de aquecimento dando início à maceração. Durante a maceração, o amido e as proteínas são desdobrados. A massa resultante da maceração é direcionada para elementos filtrantes que separam o mosto do bagaço. O produto oriundo da filtragem é encaminhado para as caldeiras (reservatórios aquecidos), onde posteriormente sofrerão a adição do lúpulo e expostos a temperaturas de 100°C por aproximadamente uma ou duas horas. Esta etapa tem por fim realizar a esterilização do mosto, retirada de substâncias amargas advindas do lúpulo, extração do excesso de água por meio de evaporação e as proteínas não estabilizadas são coaguladas (GALLEGO;1998).

Após a fervura, ocorre a maturação que caracteriza, inicialmente pela fermentação, constituindo-se pela queda de temperatura do líquido recém fervido e a participação do fermento por um tempo determinado em função do teor alcoólico desejado. Na maturação pós-fermentação, em temperatura fria, ocorre a constituição de características específicas de cada cerveja como aroma, sabor e cor. Quando necessário, também ocorre o processo de clarificação para que ocorra a subtração remanescentes dos processos anteriores.

As fases finais do processo cervejeiro são envasamento e entrega ocorrendo pasteurização nos casos das cervejas e sem pasteurização para o caso do chopp. A pasteurização consiste em um processo de eliminação de agentes biológicos que podem configurar como ameaças à saúde humana e proliferarem com a presença de matéria orgânica de alimentos. O processo ocorre através da elevação e manutenção

da temperatura em um patamar e queda brusca dessa temperatura. Esse choque térmico esteriliza e promove a morte de todos os agentes biológicos do alimento, responsáveis pela fermentação e maturação. Após envase e rotulagem, o produto está pronto para a comercialização (OLAJIRE;2012).

É identificada, tanto no processo cervejeiro quanto de envase, a necessidade de fornecimento de energia elétrica confiável e constante e confiável para acionamento de bombas de solução, batedores, esteiras de transporte de garrafas e compressores de refrigeração (15% aproximadamente do consumo de energia elétrica do processo). As linhas de vapor são necessárias para processos como cozimento, pasteurização e outros (GALLEGO;1998).

2.2 Resíduos do Processo Cervejeiro

Realizando uma análise do processo produtivo da cerveja, nota-se a ocorrência da produção de vários resíduos sólidos e efluentes líquidos em diferentes etapas do processo de obtenção do produto cerveja. Frente a uma infinidade de resíduos e efluentes encontram-se o trub grosso, levedura residual, trub fino, água de lavagem, resíduos de cerveja e o bagaço de malte.

Volume e características são fatores determinantes para a variação da gênese de efluentes líquidos. A lavagem de equipamentos é um exemplo forte da quantidade elevada de efluentes produzidos, entretanto, a carga orgânica presente nesses efluentes é pequena se comparada ao volume produzido. As Etapas de filtragem e fermentação geram por volta de 3%, porém esses mesmos efluentes possuem 97% de toda carga orgânica (ENVIRONMENT CANADÁ,1997).

O bagaço de malte, tendo a nomenclatura em inglês Beer Spent Grain (BSG), é o subproduto de maior ocorrência do processo cervejeiro, constituindo 85% dos subprodutos produzidos, com uma proporção de 20 quilos de bagaço para 100 litros de cerveja (MUSSATTO et al, 2008; TOWWNSLEY, 1979). O bagaço de malte tem uma durabilidade finita e reduzida, porém é bastante versátil no que se refere à aplicabilidade (ROSA & BELOBORODKO,2015) e, apesar dos vastos modos de aplicabilidade deste resíduo (JOHNSON;PALIWAL;CENKOWSKI,2010), a produção das aplicabilidades em escala industrial estarem em seu início (ALIYU; BALA,2011). O bagaço de malte recebe a alcunha também de Resíduos Úmidos de Cervejaria – RUC (SANTOS; RIBEIRO, 2005; KLAGENBOECH et al., 2011; VIEIRA; BRAZ,2009).

Não se pode negar que estes resíduos representam benefícios para a saúde animal e humana, entretanto, um dos principais problemas envolvidos é a validade curta dos resíduos, apresentando uma rápida deterioração (ROBERTSON et al., 2010).

Como opção à rápida degradação deste subproduto, inúmeras técnicas podem ser utilizadas para a secagem dentro da própria planta de produção, envolvendo secagem e compactação, retirando aproximadamente 20% do volume de água do composto. Apesar da abordagem e vantagem, existe a necessidade de investimentos elevados para a criação de linhas específicas para a concretização da mesma ainda configura uma possibilidade distante para cervejarias não tão consolidadas no cenário (SANTOS et al., 2003), expedindo à necessidade de opções de fácil acesso e que processem em passo acelerado estas escórias.

Apesar de não serem abordadas na Lei de Pureza Alemã, as leveduras atuam como catalizadores do processo de fermentação da cerveja que não ocorre sem sua presença, pois transformam o açúcar proveniente da fervura do malte, em álcool através de um processo biológico. Este é o segundo maior subproduto da indústria, entretanto, muito subutilizado (FERREIRA et al., 2010). Este resíduo é o que possui a maior responsabilidade poluente, apresentando 3,71 kg DBO/m³ de cerveja produzida, o que representa 30% da carga orgânica poluidora do processo de produção de cerveja (SANTOS E RIBEIRO, 2005), de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 1 - Carga orgânica potencial de cada etapa do processo produtivo da cerveja

Origem	DBO		RNF	
	kg/m ³ de Cerveja	%	kg/m ³ de Cerveja	%
Levedura Excedente	3,71	30	2,55	30
Trub	3,21	26	1,24	14
Lúpulo	0,39	3	0,77	9
Licor de Grãos Prensados	0,85	7	0,5	6
Lavagens	2,09	17	0,85	10
Efluentes de Filtros	0,5	4	1,58	19
Envase	1,2	10	0,66	8
Outros	0,42	3	0,35	4
Total	120,4	100	8,5	100

Fonte: Santos e Ribeiro (2005)

O Trub é uma conjuntura das sujidades do processo de fervura, contendo frações de lúpulo, destroços de maltes e proteínas coaguladas (FILLADEAU et al., 2006). A figura abaixo apresenta os 3 principais resíduos apresentados anteriormente.



Figura 2: Resíduos do processo cervejeiro

Fonte: Bonato (2016).

Observando a conjuntura, levando em consideração a grande quantidade de matéria orgânica que ocorre nas leveduras residuais e aumento do foco pela geração de bioenergia, a digestão anaeróbia visando à geração de biogás evidencia-se uma alternativa atrativa para o resíduo em questão.

Os resíduos das indústrias cervejeiras, bagaço de malte e trub grosso, por possuírem grande quantidade de massa de matéria orgânica, possuem a necessidade de um descarte correto. Um dos destinos é a produção de ração animal, contudo, o trub grosso apresenta restrição na aplicação por conter cargas que corroboram o sabor amargo. Por este pretexto, é aconselhável sua aplicação para geração de energia através da digestão anaeróbia ou biodigestão. A digestão anaeróbia, processo lento com maior tempo de retenção, realizada por micróbios em biodigestores, produz os biofertilizantes e biogás (possível fonte de energia) (SANTOS et al.,2017).

Para Valle (1995), um elemento deixa de ser considerado resíduo a partir do momento em que assume característica de matéria prima para a produção de novos produtos. Desta forma, determinado rejeito passa a ser tratado como subproduto da produção.

2.3 A Função do Bagaço de Malte

Basicamente, a fabricação da cerveja consiste em obter o malte, preparar o mosto, fermentar o preparado, processar a cerveja e envasá-la. O principal resíduo desse processo é o bagaço de malte, também conhecido como resíduo úmido de cervejaria, polpa úmida de cervejaria ou bagaço de cevada. O bagaço de malte possui cerca de 80% de umidade, e apresenta-se sob a forma de cascas ou farelo (LOPES et al, 2015). No processo de preparação do mosto, especificamente, obtém-se o bagaço de malte. Esse processo é dividido nas etapas de moagem do malte, maceração do malte e adjunto, filtração do mosto, fervura do mosto, clarificação e resfriamento do mosto. Na etapa de filtração, o mosto é filtrado para retirar os resíduos dos grãos de malte e adjunto. Essa filtração ocorre em peneiras que utilizam as próprias cascas do malte presentes no mosto como elementos filtrantes, e a parte sólida que fica retida é o bagaço de malte (CETESB, 2005).

O bagaço de malte é gerado após a etapa de mostura e esgotamento dos grãos de malte moídos, quando já foram extraídos todos os compostos solúveis de interesse para constituição do mosto doce e sua clarificação, durante a qual o bagaço exerce importante papel como torta filtrante. Este resíduo constitui o resíduo sólido de maior quantidade gerado no processo cervejeiro (cerca de 85% do total), sendo produzido em grandes volumes ao longo de todo ano, com baixo ou sem custo algum para sua aquisição, apresentando elevado valor nutricional (Aliyu e Bala, 2011; Lima, 2010). Em geral, para cada 100 kg de grãos processados, são gerados 125 a 130 kg de bagaço úmido, com cerca de 80 a 85% de umidade, o que corresponde a cerca de 14 e 20 kg de bagaço para cada hectolitro de cerveja produzida (Fillaudeau et al., 2006).

O bagaço de malte é predominantemente fibroso (70% massa seca) e protéico (15 a 25% massa seca), apresentando também em sua composição lipídeos, minerais, vitaminas, aminoácidos e compostos fenólicos (Aliyu e Bala, 2011; Lima 2010; Robertson et al., 2010; Mussato et al., 2006). Destino usual é a venda para elaboração de ração animal. Segundo Aliyu e Bala (2011), Mussato e colaboradores

(2006) e Lima (2010), diversas aplicações podem ser citadas, como: alimentação e nutrição animal e humana; produção de energia por queima direta ou por produção de biogás via fermentação anaeróbia; produção de carvão vegetal; material adsorvente em tratamentos químicos; cultivo de microrganismos e obtenção de bioprodutos por fermentação; suporte para imobilização celular; dentre outros.

O bagaço de malte consiste basicamente da casca do grão de cevada obtida após a elaboração do mosto cervejeiro (Figura 3). Por esta razão, sua composição química pode variar de acordo com o tipo de cevada utilizada e o seu tempo de colheita, as condições de malteação e mosturação a que esta foi submetida e também com a qualidade e o tipo de adjuntos adicionados ao processo cervejeiro (HUIGE, 1994; SANTOS et al., 2003).



Figura 3: O Bagaço de Malte

Fonte: Santos (2003).

Analisando o processo produtivo da cerveja, observa-se que ocorre a geração de diversos resíduos sólidos e efluentes líquidos nas diferentes etapas de produção. Dentre estes encontram-se o bagaço de malte, o trub grosso, a levedura residual, o trub fino, os resíduos de cerveja e a água de lavagem. Os resíduos sólidos apresentam diferentes características, dependendo da etapa no qual são gerados.

Embora sua composição química possa sofrer pequenas variações, o bagaço de malte é um material lignocelulósico rico em proteínas e fibras, frações que correspondem a aproximadamente 20-30% e 70-80% de sua composição, respectivamente (HERNÁNDEZ et al., 1999). A estrutura fibrosa deste material pode ser facilmente visualizada na Figura 4.

Hemicelulose, celulose e lignina são os principais componentes destas fibras (REINOLD, 1997). Além de fibras e proteínas, o bagaço de malte também apresenta

em sua composição, lipídeos e cinzas (SANTOS et al., 2003), minerais, vitaminas e aminoácidos (HUIGE, 1994).

De acordo com Kunze (1996), 25% dos minerais presentes no bagaço de malte encontram-se na forma de silicatos. Na Figura 4, os pontos brilhantes presentes na parte externa do material correspondem a estes compostos. Nota-se, portanto a presença de grandes quantidades de silicatos na estrutura do bagaço de malte.

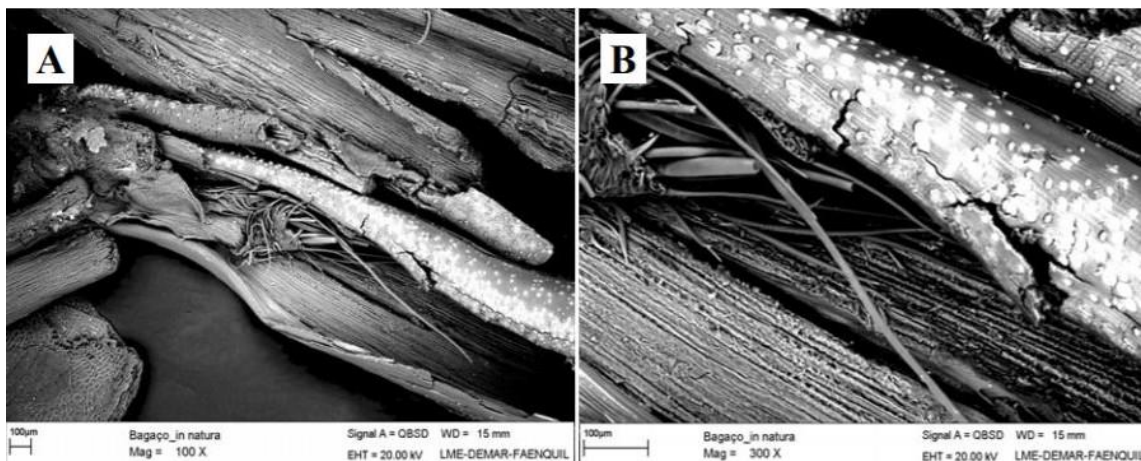


Figura 3: Representação dos minerais presentes no bagaço de malte

Fonte: Kunze (1996).

A possibilidade de emprego do bagaço de malte em processos de bioconversão tem sido muito pouco explorada. Carvalho et al. (2004a) hidrolisaram o bagaço de malte com ácido diluído e verificaram que o hidrolisado produzido, rico em açúcares, proporcionou elevados rendimentos em biomassa quando fermentado pela levedura *Debaryomyces hansenii*.

Uma questão que praticamente define a utilização ou não como um substrato, a caracterização depende dos fatores concentração e composição.

A concentração depende de alguns indicadores como o teor de matéria seca (MS) e o teor de matéria orgânica seca. Para a nossa abordagem apenas esses dois são relevantes. Existem outros fatores a serem abordados quando utilizamos, por exemplo, substratos líquidos, mas não serão utilizados no foco desse trabalho.

A proporção de matéria biodegradável de um substrato define-se pelos teores de umidade e de matéria seca.

Esse processo de determinar a quantidade de matéria orgânica na matéria seca é de suma importância para conhecer e saber o grau de degradabilidade. Alguns

autores citam valores de referência que facilitam a previsibilidade da produção de biogás esperada a partir do teor de matéria orgânica seca. Ácidos voláteis a vapor são expulsos da matéria durante o processo de secagem esse tipo de componente não participa do resultado da análise.

Um detalhamento mais específico da caracterização do substrato é provido pela classificação dos seus componentes. Os componentes determinam os tipos de compostos intermediários formados.

A concentração do substrato é um fato indispensável para a confiabilidade do balanço de massas. A determinação da concentração do substrato é um fator de suma importância para a confiabilidade do processo de balanço de massas. A discretização complementar da composição da composição pode ser utilizada para avaliar qualitativamente o substrato.

2.4 Digestão Anaeróbia

A formação de metano não ocorre em ambientes onde oxigênio, nitrato ou sulfato encontram-se prontamente disponíveis. A produção do gás metano acontece em ambientes com características tais como pântanos, solo, sedimentos de rios, lagos, mares, assim como nos órgãos digestivos de animais ruminantes. No processo de conversão de matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio são utilizados aceptores de elétrons inorgânicos como ao NO_3^- (redução de nitrato), SO_4^- (redução de sulfato), ou CO_2 (formação de metano). A formação de metano não ocorre em ambientes onde oxigênio, nitrato ou sulfato encontram-se prontamente disponíveis.

A digestão anaeróbia possui um sistema ecológico precisamente balanceado, onde cada microorganismo tem uma função específica. As bactérias geradoras de metano desempenham duas funções primordiais: produção do metano, possibilitando a retirada de carbono orgânico do ambiente anaeróbio, e o consumo de hidrogênio, proporcionando condições para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, que é convertido em metano (SOUBES, 1994).

A digestão anaeróbia de compostos orgânicos complexos é usualmente considerada um processo de dois estágios. No primeiro estágio, um grupo de bactérias denominadas formadoras de ácidos ou fermentativas, converte os orgânicos complexos em outros compostos. Compostos orgânicos complexos como

carboidratos, proteínas e lipídios são hidrolisados, fermentados e biologicamente convertidos em materiais orgânicos mais simples, principalmente ácidos voláteis.

No segundo estágio ocorre a transformação dos ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos, o metano e o gás carbônico. Esta conversão é efetuada especialmente por um grupo especial de bactérias, denominadas formadoras de metano, as quais são estritamente anaeróbias. As bactérias metanogênicas dependem do substrato fornecido pelas acidogênicas através do comensalismo. Uma vez que as bactérias metanogênicas são responsáveis pela maior parte da egradação do resíduo, a sua baixa taxa de crescimento e de utilização dos ácidos orgânicos normalmente representa o fator limitante no processo de digestão como um todo.

A digestão anaeróbia é de grande complexidade e interdependência dos agentes que participam de cada etapa da decomposição. Neste tipo de ambiente, a decomposição da matéria é um processo de flora mista, do ponto de vista microbiano, que na falta de oxigênio molecular transforma matéria orgânica em matéria gasosa, de constituição basicamente metano e dióxido de carbono. Esse processo é composto por etapas que serão descritas a seguir:

Hidrólise: Solubilização de matéria orgânica complexa insolúvel como por exemplo, proteínas, lipídios e carboidratos. Essa matéria é decomposta em substâncias de complexidade menor como por exemplo aminoácidos, ácidos graxos e açúcares solúveis, através da presença de exo-enzimas provenientes das bactérias hidrolíticas fermentativas. Os resultados dessa etapa têm a condição para transpassar a parede celular e as membranas das bactérias responsáveis pela acidogênese, processo que será descrito na próxima etapa.

- **Acidogênese:** Processo caracterizado pela presença das bactérias fermentativas acidogênicas que utilizam produtos da hidrólise que agora se caracterizam como componentes orgânicos solúveis, metabolizando os mesmos e realizando a transformação para gás carbônico (CO₂), gás hidrogênio (H₂), álcoois, ácidos orgânicos que, ao fim do processo, serão excretados para o exterior da célula.
- **Acetogênese:** O metabolismo das bactérias fermentativas acidogênicas produz produtos que são convertidos em gás hidrogênio (H₂), ácido acético e dióxido de carbono (CO₂) por meio da atividade de bactérias homoacetogênicas e bactérias

acetogênicas produtoras de hidrogênio. O processo de fermentação acidogênica desempenha uma função importante na conversão de matéria orgânica em energia, sob a forma de metano, desse modo, para que a produção de energia tenha viabilidade econômica, a conversão de substrato para acetato deve ter certa rapidez. Não ocorrendo essa velocidade, nem essa conversão, configurará o acúmulo dos produtos da hidrólise e da fermentação ácida no reator, impedindo a ocorrência da metanogênese.

- **Metanogênese:** As arqueas metanogênicas acetoclásticas, que produzem metano e material celular a partir do ácido acético, e as arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que são responsáveis pela associação do hidrogênio e dióxido de carbono para a formação de gás metano. Segundo YANG & GUO (1990), a redução de acetato representa 70% da produção de metano enquanto a redução de hidrogênio (H₂) e gás carbônico é responsável pela formação do metano restante.

- **Sulfetogênese:** Potencial problema à digestão anaeróbia quando a água residual possui grandes concentrações de sulfato. Basicamente é a redução do sulfato a sulfeto. Essa concentração de sulfeto reduz o potencial energético do biogás pelo fato do sulfeto ser tóxico, em grandes concentrações, para as bactérias produtoras de metano, já que seu substrato é o mesmo que o utilizado pelas bactérias.

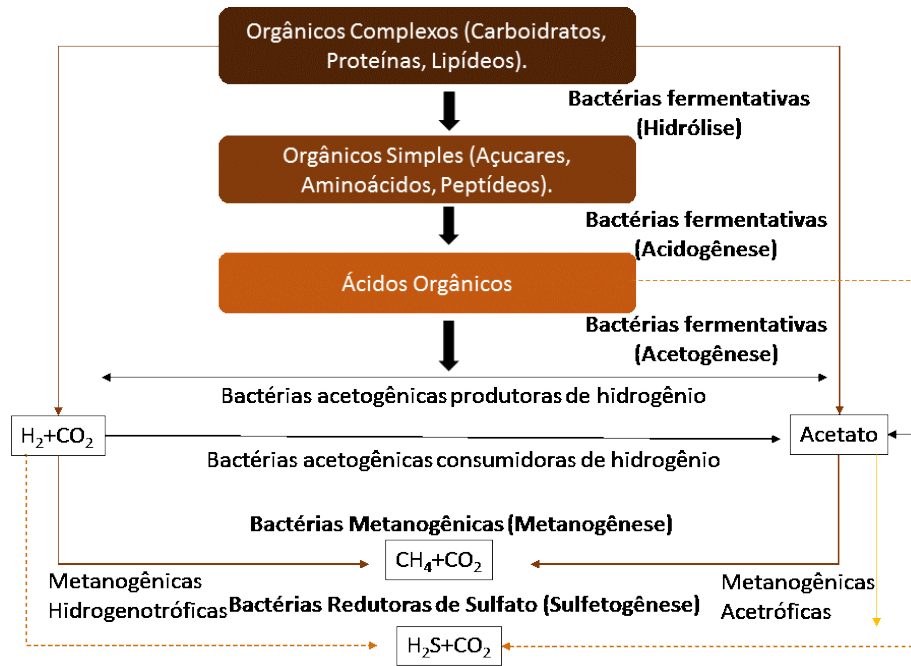


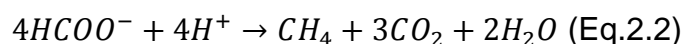
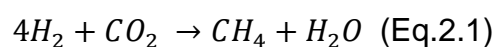
Figura 4: Fases da Digestão Anaeróbia

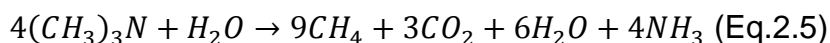
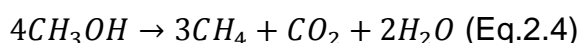
Fonte: Dias (2014).

É possível constatar uma relação de dependência dos grupos de bactérias após a explicação das etapas. Desta forma, é visível que as bactérias hidrolíticas produzem substrato para as acidogênicas que produzem substrato para as acetogênicas produzem substrato para a atividade das metanogênicas.

O equilíbrio é essencial para que ocorra a metanogênese em seu total potencial. A fase crítica de todo processo é a fase de produção de metano devido à sensibilidade dos agentes formadores às condições do meio sendo o primeiro grupo a sofrer com os efeitos deletérios de situações de estresse ambiental. Segundo CASSINI (2003), a temperatura deve estar na faixa de 35°C e pH entre 6,8 e 7,4.

As bactérias produtoras de metano utilizam uma quantidade bem restrita de substratos, abaixo apresenta-se as reações balanceadas envolvendo, em ordem, a oxidação do hidrogênio, ácido fórmico, monóxido de carbono, metanol, metilamina e acetato, nesta ordem:





O objetivo do processo analisado é a produção de metano, por isso é necessário criar condições favoráveis para acelerar o processo de digestão anaeróbia englobando condições de operação e projeto.

Abordando a temática de projeto, a quantidade de microrganismos ativos e o intenso contato entre a matéria orgânica disponível e a massa microbiana são requeridos no sistema. Quando é abordada a operação, o pH, a presença de elementos nutrientes e a ausência de materiais tóxicos na matéria a ser decomposta e utilizada como substratos, são fatores que desempenham o maior papel de relevância. A temperatura, o pH, os nutrientes, e a alcalinidade desempenham também grande importância no processo.

As características do substrato e as condições de ocorrência do processo são determinantes para a composição do biogás. A título de conhecimento, JORDÃO E PESSÔA (2011) definiram uma composição típica obtida através do processo de digestão anaeróbia.

Tabela 2 - Principais componentes do biogás gerado em digestores

Gás	Composição (%)
Metano	60 - 75
Gás Carbônico	25 - 35
Óxido de Carbono	2 - 4

Fonte: Jordão e Pessoa (2011).

2.4.1 Cinética da Digestão Anaeróbia

As velocidades de crescimento dos microrganismos, velocidades de consumo dos substratos e de geração de produtos são os pilares da cinética bioquímica do processo.

População de microrganismos e sua velocidade de crescimento desempenha uma relação diretamente proporcional com o tempo requerido para seu crescimento juntamente com a utilização do substrato e com a velocidade de metabolismo.

Com um controle efetivo das condições ambientais e, obviamente, oferecendo insumos favoráveis ao crescimento dos microrganismos, é garantido o consumo efetivo do substrato degradado.

METCALF & EDDY (2003), definem que as bactérias possuem um perfil de crescimento padrão que possui 3 fases de acordo com a Figura 6.



Figura 5: Curva típica do crescimento bacteriano

Fonte: Metcalf & Eddy (2003)

- **Adaptação ou Lag:** Adaptação dos agentes decompositores ao meio ocorre um ganho de massa celular sem reprodução. O número de indivíduos não sofre alteração;
- **Crescimento logarítmico:** O crescimento populacional é característico dessa fase, tanto a massa celular quanto o número de indivíduos sofrem uma duplicação. A taxa, é determinada através do tempo de geração e do potencial de consumo e processamento do substrato;
- **Estacionária:** número de indivíduos constante devido ao limite do meio, ou seja: consumo total do substrato, ou ao equilíbrio entre células mortas e células vivas.

- **Decaimento ou fase endógena:** a morte celular prevalece como processo e ocorre uma queda do número de agentes decompositores.

A fase 2 é a que representa a maior importância para o perfil de crescimento microbiano, uma vez que a taxa de degradação em processos biológicos de resíduos orgânicos é configurada por uma função do número de agentes decompositores presentes.

Há dificuldade em se traduzir, segundo SILVA (2009), as reações enzimáticas dos processos da digestão anaeróbia devido à complexidade dos substratos e à variedade de populações de agentes decompositores.

2.4.2 Reatores Anaeróbios

Os reatores anaeróbios são elaborados com uma tecnologia bastante popular, devido à simplicidade de funcionamento para efluentes com elevada carga orgânica. A pesquisa científica sobre sistemas anaeróbios de tratamentos de rejeitos, notadamente os reatores de manta de lodo (UASB), permitiram ao sistema maior destaque, no Brasil e no mundo, devido, em grande maioria, às condições de funcionamento (CUNHA e NETO, 2000). Este tipo de reator que no início dos anos oitenta era de uso irrisório por possuir poucas pessoas que utilizavam, passou a ocupar posição de destaque pela elevada aceitação posterior. Entretanto, há pesquisadores cujos trabalhos trazem observações contrárias aos processos anaeróbios de geração de gás. É importante lembrar que parte das críticas são originárias de preconceitos ou conhecimento insuficientes do processo de geração anaeróbica de gás.

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico em que na ausência de oxigênio a matéria orgânica é decomposta gerando uma mistura de gases, prioritariamente, metano e dióxido de carbono. Esse processo ocorre em diversos ambientes naturais, por exemplo, nos pântanos e no aparelho digestivo de animais superiores (CHERNICHARO, 1997).

Atualmente, há um grande interesse na digestão anaeróbia como um meio de produção de biogás a partir da degradação biológica da biomassa disponível in loco, podendo ser essa biomassa: rejeitos industriais, rejeitos agrícolas, rejeitos sólidos urbanos e águas residuárias (NGES et al., 2012; LUSTE et al., 2012) envolvendo um

processo profundo de várias reações químicas biodesempenhadas por um grande número de microrganismos (RAO & BARAL,2012). A digestão anaeróbia é um tratamento efetivo e de baixo custo capaz de reduzir o teor de matéria orgânica de resíduos, enquanto propicia a produção de biogás (MOLINUEVO-SALCES et al., 2012), sendo considerada uma tecnologia efetiva para o tratamento eficiente de vários tipos de resíduos (ZHANG et al.,2011).

O processo de digestão anaeróbia mantém estabilizados os materiais orgânicos através de sua degradação, produzindo o biogás e um resíduo com de grande potencial fertilizante. De acordo com Mairet et al. (2011), com este processo não apenas se recupera a energia contida na biomassa, mas também conduz à liberação de nutrientes para a própria digestão. Já para Bayr et al. (2012), este tipo de tecnologia é uma alternativa de forma sustentável para produção de energia a partir de matéria orgânica, incluindo os resíduos biodegradáveis, no qual o biogás é convertido a partir de resíduos orgânicos por microrganismos.

2.4.3 Despejos Passíveis de Serem Tratados por Via Anaeróbia

Em relação ao tratamento de esgotos domésticos verifica-se uma crescente utilização da tecnologia anaeróbia (VON SPERLING, 1995), notadamente através dos reatores tipo UASB. Entretanto, esta tecnologia que depende da proliferação de bactérias anaeróbicas é cessaível a variações da temperatura da matéria prima e não se consegue produtividade para valores abaixo de 20°C. Os processos em que se usam partes do gás gerado para aquecer a matéria prima não pode ser aplicado para o esgoto doméstico por ser este muito diluído.

O tratamento anaeróbio de esgotos domésticos torna-se bem mais atrativo para os países de clima tropicais e subtropicais, que são principalmente os países em desenvolvimento.

Todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, sendo que o processo se mostra mais eficiente e mais econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis.

Atualmente, diversas estações de tratamento anaeróbio já se encontram em operação no Brasil, no México e na Colômbia, enquanto grandes estações encontram-se em construção na Indonésia, Venezuela, Equador e Índia (GTZ–TBW, 1997).

2.4.4 Características dos Processos Anaeróbios

As diversas características favoráveis dos sistemas anaeróbios, passíveis de serem operados com elevados tempos de retenção de sólidos e baixíssimos tempos de detenção hidráulica, conferem aos mesmos um grande potencial para a aplicabilidade em tratamentos de águas residuais de baixa concentração. Estes equipamentos utilizam tecnologias simples, de baixo custo, de fácil operação e manutenção. Nos sistemas anaeróbios, ocorre somente cerca de 40 a 50% de degradação biológica, com conseqüente conversão em CO₂. Verifica-se uma enorme incorporação de matéria orgânica como biomassa microbiana (cerca de 50 a 60%), que vem a se constituir o lodo excedente do sistema. O material orgânico não convertido em gás carbônico ou em biomassa deixa o reator como material não degradado (5 a 10%). Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte do material orgânico biodegradável presente é convertida em biogás (cerca de 70 a 90%). Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir o lodo excedente do sistema. O material não convertido em biogás ou em biomassa deixa o reator como material não degradado (10 a 30%).

Os efluentes tratados dos reatores anaeróbios apresentam maior quantidade de materiais não degradados do que nos reatores aeróbios, entretanto, os reatores anaeróbios são indicados como sistemas integrados de proteção ambiental por serem eficazes no tratamento de esgotos e disponibilizarem para reuso seus subprodutos (LETTINGA, 1995).

O fato de o efluente tratado pelos reatores anaeróbios possuir mais material não degradado que os efluentes dos reatores aeróbios podem ser compensados pelo baixo custo de implantação e manutenção e pela geração de gás de alto poder calorífico. A utilização destes sistemas é indicada principalmente para os países em desenvolvimento, que apresentam graves problemas ambientais, falta de recursos, falta de energia e, baixa produção de alimentos (BARROS et al, 1995). Neste sentido a digestão anaeróbia apresenta-se como alternativa integrada de tratamento de esgotos e de recuperação de subprodutos.

2.5 Desafios da Gestão Ambiental

BRAUN (2010) define que a reciclagem é a modificação das propriedades biológicas, físicas ou físico-químicas de rejeitos sólidos por meio de sua transformação em matéria-prima ou novos produtos e que um produto reciclado possui um valor social e é um bem econômico, gerador de trabalho, renda e fomentador da cidadania. Além disso, ainda complementa que a reciclagem não é a única oportunidade de gerenciamento de resíduos sólidos, devendo também ser vistas, em ordem de prioridades a: i) não geração, ii) redução, iii) reutilização; iv) a própria reciclagem; v) tratamento dos resíduos sólidos e; vi) a disposição final adequada.

Majoritariamente, a indústria aborda, para tratamento de seus resíduos, uma abordagem de fim de tubo (end-of-pipe), o tratamento da poluição gerada por seu processo é feito no descarte dos poluentes, consolidando equipamentos e instalações que tendem a subir os custos de seus produtos, uma vez que não agregam valor aos mesmos (OTTO; WOOD, 2001). Por outro lado, o ZWIA (2016) estipula que o conceito Zero Resíduos (Zero Waste) está ligado à expansão e gestão de produtos e processos para evitar e eliminar sistematicamente o volume e a toxicidade de lixo e materiais.

A Lei nº 9.605/1998, afeta diretamente as empresas de bebidas no tocante aos seus projetos de instalações fabris, em razão dos danos à flora e fauna dos locais escolhidos, e funcionamento, em virtude do necessário controle e tratamento das emissões de poluentes: gases, sólidos e líquidos. Na Constituição Federal, no artigo 225, parágrafo 3, existe a alusão de punição a todos, cidadãos ou empresas, que porventura ocasionem danos ambientais em atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas e jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados (BRASIL, CF/88, ART. 225).

As operações produtivas das indústrias de bebidas no país sofrem influência e necessitam adequar seu funcionamento, a uma série de leis e resoluções – federais, estaduais e municipais, que devem ser observadas e cumpridas. Estes instrumentos legais afetam a gestão política e econômica das empresas no tocante às suas relações com seus clientes, consumidores finais, concorrência, fornecedores, governo, entidades organizadas etc. Em face do escopo deste trabalho, são apresentados a seguir os principais aspectos legislativos que incidem sobre as indústrias de bebidas instaladas no estado do Rio de Janeiro, quanto à questão ambiental.

A Constituição do estado do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 1989:124-132) apresenta um capítulo referente ao meio ambiente - capítulo VIII, com 21 artigos aludindo às diversas questões ligadas ao assunto. Dentre estes artigos, pode-se destacar o art. 261. Em seu parágrafo 1º, incumbe ao Poder Público uma série de atribuições referentes a assegurar a efetividade do direito ao meio ambiente ecologicamente saudável e equilibrado.

O conceito do Tripple Bottom Line, onde Elkington (2001) postulou os três fatores imperativos para as organizações se tornarem sustentáveis, conhecido como o tripé da sustentabilidade, no inglês, como (People, Planet e Profit) em português (Pessoas, Planeta e Lucro) reformulado como fatores sociais, econômicos e ambientais.

Em preferência à finitude iminente dos recursos naturais e o pujante impacto socioambiental presenciados pelas empresas na década de 1970, as companhias iniciaram os debates dessa problemática em questão, com o objetivo de propor uma reflexão em relação a culturas insustentáveis e tendo um ponto de vista econômico, relacionado ao conceito de sustentabilidade: a relação com a taxa de crescimento do sistema econômico. Nessa perspectiva, as organizações repensaram suas responsabilidades em função da sociedade e começaram a promover a busca pela sustentabilidade utilizando disto, uma estratégia competitiva (SILVA et al., 2012.) O fator social tange ao capital humano, o pensar no contexto social dos colaboradores envolvidos, ofertando oportunidades e um ambiente com qualidade em educação, saúde e o modo de como essa esfera atinge a comunidade ao redor da organização. O fator econômico refere-se ao modelo de produção, distribuição de bens e serviços levando em consideração os outros dois fatores. O terceiro fator é a questão ambiental, a problemática do capital natural, partindo do pressuposto que toda atividade econômica tem impacto ambiental negativo, em prioridade desse fator é a satisfação das necessidades humanas tendo a visão de mitigar os impactos ambientais. Tais fatores devem funcionar de forma harmônica e orgânica, um em detrimento do outro, satisfazendo o conceito do tripé da sustentabilidade (Oliveira, L. R. et al. 2012). Em termos de Brasil, Abramovay, Speranza e Petitgand (2013) confirmam dados de crescimento na taxa de geração de rejeitos pela sociedade em abrangência e aborda o referencial dos resíduos sólidos, os processos em preferência da coleta desses resíduos, os impactos em toda a cadeia sustentável: seu tripé social, econômico e ambiental.

2.5.1 Produção Eficiente

Uma produção eficiente ou produção limpa deve focar na redução em toxicidade e quantidade de todas as emissões e resíduos antes de sua saída do processo produtivo. As técnicas e ferramentas existentes relacionadas a esta área separam a Produção Eficiente em dois grupos: i) voltados para mitigar as emissões e resíduos e, ii) voltados para a reutilização destas emissões e resíduos (RIVERA et al., 2009).

Rahin e Raman (2015) Demonstram algumas oportunidades e benefícios que podem ser gerados a partir da implementação da produção eficiente e limpa. A Tabela 3 abaixo destaca características relacionadas ao conceito.

Tabela 3 - Características da produção limpa

No.	Oportunidades	Benefícios Esperados
1	Desenvolvimento de procedimentos para todas as atividades e processos industriais	> Prevenção de desperdício de energia devido a retrabalho e; > Prevenção de geração de perdas por má-qualidade
2	Segregar as perdas conforme classificação	> Aprimoramento das habilidades de reciclagem e reuso de materiais
3	Implementação de práticas First in First out (FIFO)	> Redução da geração de perdas devido a materiais fora da validade
4	Minimização da frequência de set-up de produto	> Redução de desperdício de água devido à atividades de limpeza
5	Manutenção programadas de células de operação	> Redução de perda de material por vazamento
6	Treinamento apropriado em embalagem	> Redução de perdas por materiais de embalagem fora de especificação

Fonte: Dias (2016).

Severo et al. (2012) abordam o conceito de Produção Eficiente ou Produção Limpa destacando que o mesmo deve considerar questões ambientais influenciadoras em todos os níveis da organização, buscando tornar o processo mais eficiente através de ações realizadas na companhia, principalmente no processo produtivo. Uma abordagem importante a se destacar é que o tamanho de uma organização não é um fator de importância nas saídas relacionadas ao meio ambiente, levando à conclusão

de que o desempenho da companhia é resultado direto da aplicação de práticas de sustentabilidade ambiental. Seguindo essa diretriz, destaca-se que estas soluções podem ser motivadoras para que as empresas efetivem a produção limpa para lograrem melhores resultados (SEVERO et al., 2015).

2.5.2 Ecoeficiência

Em razão do consolidado mercado consumidor, o Brasil se posiciona entre os três mais significativos produtores de cerveja do mundo. São produzidos cerca de 13,8 bilhões de litros por ano (VALENTE JÚNIOR;ALVES, 2016).

A indústria cervejeira destaca-se no setor de bebidas por participar de forma bastante significativa na economia nacional (SOLDERA; OLIVEIRA, 2016). Nos últimos anos quatro grandes empresas atuam expressivamente no mercado cervejeiro no Brasil: Uma grande cervejaria localizada na Zona Oeste do Rio de Janeiro, Brasil Kirin, Heineken e o Grupo Petrópolis (FERREIRA, 2016).

Pereira e Lima (2008) atestam que o setor cervejeiro consome muita água, sendo grande parte desse uso concentrada nas etapas de lavagem de embalagens e fermentação. O rendimento ótimo do uso dos recursos, principalmente da água, tem levado a indústria a buscar por práticas ambientalmente saudáveis (SALVADOR; MARINHO, 2015).

A ecoeficiência é uma estratégia ambiental preventiva e conjunta que tem como propósito a atenuação na fonte de resíduos e emissões, o incremento da produtividade através da uso eficiente de matérias-primas e a redução do impacto ambiental durante o ciclo de vida dos produtos (KAZMIERCZYK, 2002).A ecoeficiência é considerada um dispositivo valioso porque é mais racional eliminar ou reduzir os resíduos e emissões na fonte, do que tratá-los e controlá-los após sua geração. Essa linha de raciocínio vem ganhando a atenção das corporações e parte da verificação de que os privilégios econômicos são essenciais ao uso eficiente das matérias-primas, energia e água (VAN BERKEL, 2007; JR. PHILIPPI et al. (2016). A sua evolução está baseada fortemente na racionalidade econômica, com o objetivo de apresentar soluções para os impactos ambientais desconformes da produção industrial (KJAERHEIM, 2005; MELLO, 2002).

A abordagem da Ecoeficiência estratifica as alternativas de medidas preventivas da poluição por meio da sequência de níveis de importância, como visualizado no fluxograma Figura 7. A prioridade baseia-se em adotar medidas como mitigação de resíduos desde a fonte geradora, alternativas de matéria-prima e alterações no produto ou processo (nível 1). Os despojos que não podem ser evadidos devem, preferencialmente, ser realocados no processo produtivo por através da reciclagem interna (nível 2). Visto impedimentos, medidas de reciclagem externa e de aplicação final adequada devem consideradas (nível 3).

Figura 6 - Abordagem da Produção Mais Limpa

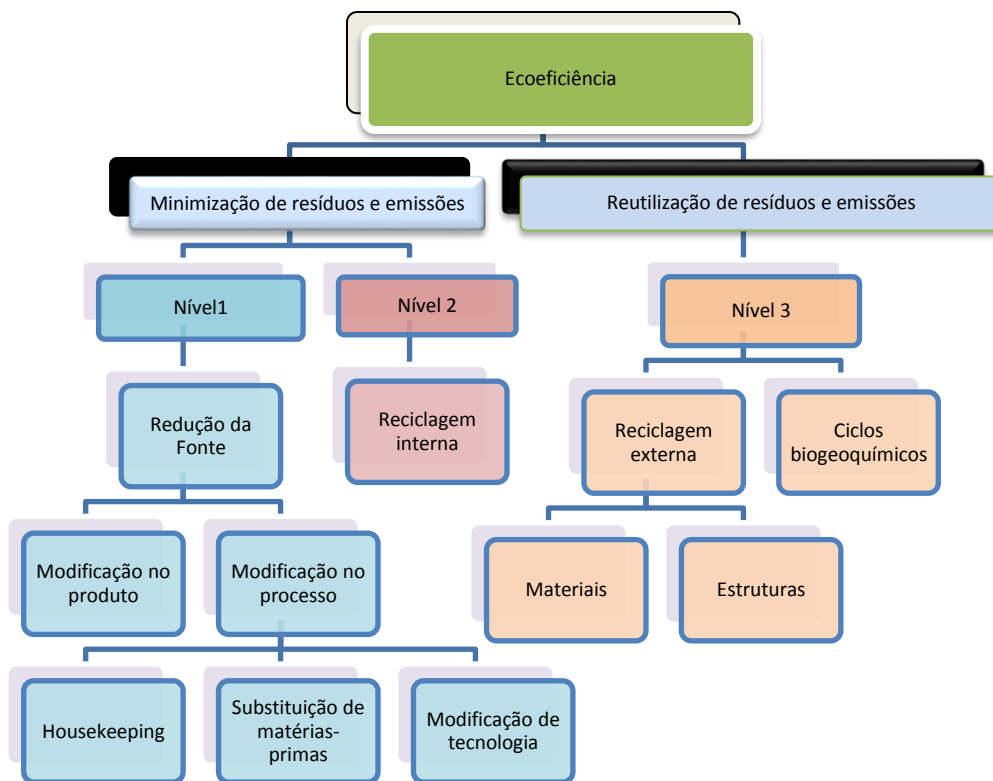


Figura 7: Abordagem da Produção mais limpa

Fonte: Adaptado de CNTL (2000) apud Coelho (2004, p. 47)

Ecoeficiência é um modelo de produção e consumo sustentável e tem como fundamento a ideia de que a competitividade da empresa aumenta através da redução de materiais e energia por produto ou serviço, trazendo ainda a redução de pressões sobre o meio ambiente (BARBIERI, 2011). Nesse caso, uma empresa poderia tornar-

se ecoeficiente ao: i) minimizar a intensidade de materiais e energia nos produtos e serviços; ii) minimizar a dispersão de materiais tóxicos pela empresa; iii) aumentar o nível de reciclabilidade de seus materiais; iv) maximizar o uso de recursos renováveis; v) aumentar a durabilidade de seus produtos e; vi) incrementar a intensidade de serviços (WBCSD, 1996). Conforme Bertolino (2012), a estratégia da Ecoeficiência atua por meio da combinação de três fatores: a) melhoria tecnológica, buscando substituir e mudar as condições físicas das fontes poluidoras por tecnologias ecológicas; b) aplicação de know-how, visando adotar as melhores técnicas de gestão ambiental, fazendo alterações por meio de práticas de housekeeping e revisando políticas de integração; c) mudança de atitudes, ensejando encontrar uma nova abordagem para o relacionamento entre a indústria, meio ambiente e comunidade. Essas práticas focam mais a parte operacional do negócio, e pode-se dizer que a Ecoeficiência também foca na parte estratégica. A Ecoeficiência oferece resultados econômicos positivos de curto prazo, além de possibilitar a redução de insumos e da poluição. Entretanto a abordagem precisa de uma visão de longo prazo para estabelecer relações adequadas entre a indústria e o meio ambiente (NEWCORN,2014).

Muitas barreiras são enfrentadas, apesar dos aspectos positivos, a ausência de políticas públicas e investimentos específicos para a Ecoeficiência tem dificultado a adoção de programas de ecoeficiência nas indústrias brasileiras, como apontado por Pimenta e Gouvinhas (2011). Outras barreiras encontradas são: a resistência à mudança, falta de informação, recursos financeiros e questões relacionadas a integração entre empresas e equipes.

2.5.3 O Conceito de Emissões Zero

O conceito de emissões zero exige a reformulação dos processos industriais para que os rejeitos sejam totalmente reutilizados, sendo o futuro da evolução dos conceitos de produção limpa, conforme apresentados na Figura abaixo (BRAUNGART; MCDONOUGH; BOLLINGER, 2006; KUEHR, 2007). A mitigação perdas a zero é o que norteia a indústria, entretanto todo processo gera extravios, o que leva a companhia a recolocar na cadeia as saídas que não foram convertidas em produto. Entretanto, a visão de chegar ao "zero" desta forma pode nunca ser atingida individualmente, mas sim através da formação de conjuntos produtivos locais que

objetivam, através das relações entre seus membros, aproveitar como insumos do processo de um, as emissões do processo de outro (PAULI, 1997; KUEHR, 2007). Nesse sentido, Pauli (2015) propõe a criação de conjuntos para o segmento de cervejeiro, destacando, por exemplo, o bagaço de malte que pode ser usado em conjunto com farinha e a partir disto pães mais saudáveis podem ser gerados por empresas externas ao ramo cervejeiro, como padarias. Uma cervejaria utilizando o conceito de zero emissões é apresentada na imagem abaixo:

Tabela 4 - Produção Limpa X Emissões Zero

Redução Limpa (Reduzir, Reciclar, Reutilizar)	Emissão Zero (Produtividade total)
Minimização dos efeitos posteriores	Novas indústrias na cadeia
minimização dos resíduos	Agregação de valor
Mínimos custos	Aumento de receitas
Modificação de processos individualmente	Agrupamento de empresas
Análise de entradas e saídas	Conexão entre entradas e saídas
Minimização de resíduos através da modificação do processo de produção	Abordagem integral, geração de empregos
Durante processo	Objetivo final

Fonte: Produção Própria (2019).

Kuehr (2007) também ressalta as principais abordagens desta filosofia que se dividem em:

- i) Grandes sistemas de energia e materiais, com a formação de clusters onde as entradas de uma empresa são provenientes das perdas de outra empresa, no caso;
- ii) Pequenos sistemas de energia e materiais, levando em consideração os retornos de materiais para a indústria de alimentícia e agricultura;
- iii) Sistemas regionais, através da união consistente e eficiente do conhecimento entre os interessados, evitando assim retrabalho.

Em complemento ao conceito de zero emissões, a filosofia ZERI, proposta por Pauli (1996), traz como objetivos evitar a geração de resíduos gasosos, líquidos e sólidos, utilizar todos os resíduos como matérias primas da produção e aplicar os resíduos gerados, quando não for possível evitá-los, para que outras corporações gerem valor agregado a estes. Essa ótica sistêmica de cadeias produtivas tenta trazer ao âmbito corporativo sistemas em conformidade aos que acontecem na natureza, além de incentivar a criação de empregos e a redução da pobreza devido também à procura de novas técnicas e opções para um sistema sustentável de provisões. Essa interpretação é chamada de upsizing (PAULI, 1996; PAULI, 1998).

2.6 O Biogás

A geração de biogás ocorre através da digestão anaeróbia da matéria orgânica. Os micro-organismos decompõem a estrutura orgânica, formando metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) (LOPES, 2015). A proporção de cada gás na mistura depende do digestor e do substrato, matéria orgânica a ser digerida. Mas a composição é basicamente formada por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (CENBIO, 2001).

Além do metano, cerca de 65 a 75% da sua composição e o gás carbônico (25% a 35%), ele também apresenta na sua mistura o gás sulfídrico e outros elementos como amônia (CASSINI, 2003). A presença de impurezas no biogás diminui seu poder calorífico, uma vez que esses componentes absorvem parte da energia gerada. O poder calorífico do biogás bruto é de 6KW/h, enquanto que ele purificado gera 9KW/h. (PECORA, 2006). Dessa forma, alguns compostos como o gás sulfídrico, gás carbônico e umidade devem ser removidos para que se possa utilizar o biogás para combustão (IEA, 2013).

O biogás é uma mistura gasosa e combustível, subproduto da digestão anaeróbia, que é um processo fermentativo que tem como objetivo a remoção de matéria orgânica do meio, a formação do biogás ocorre durante esse processo de forma espontânea. A produção do biogás também é possível a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos como esterco de animais, lodo de esgoto, resíduo doméstico, agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas (PECORA, 2006). A anaerobiose acontece em biodigestores que são “uma câmara fechada onde a

biomassa é fermentada, pela ação de bactérias metanogênicas, sem a presença de ar.

Como resultado da fermentação anaeróbica, é gerado biogás e um material que pode ser usado como fertilizante” LOPES (2015, p.25). Quando utilizados biodigestores especialmente planejados para produção do biogás, a mistura gasosa pode ser utilizada como combustível, devido ao seu alto poder calorífico, sem emissão de gases tóxicos a atmosfera durante a sua queima e ainda possibilidade de aproveitamento do lodo orgânico gerado no processo que é um excelente biofertilizante. Conversão energética é o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás a energia química armazenada em suas moléculas pode ser transformada em energia mecânica por um processo controlado de combustão. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica. Outra alternativa é utilizar a queima do biogás diretamente em fornos ou caldeiras, utilizando seu poder calorífico como energia térmica (PECORA, 2006). A conversão do biogás em energia pode ser feita através de motores de combustão interna utilizados a princípio com diesel ou gás natural, porém adaptados para biogás. Essa adaptação se faz necessária devido a presença de umidade, gases inertes e gases ácidos que podem levar à deterioração precoce dos motores. Assim, além do moto-gerador, normalmente outras tecnologias para purificação do biogás são instaladas (CENBIO, 2001).

Nos países desenvolvidos, o biogás é reconhecido como uma tecnologia eficaz para tratar rejeitos, desempenhando um papel significativo na melhoria da questão de energia, meio ambiente, saúde e ainda reduzir as emissões de gases de efeito estufa (SASSE, 1998). Muitas pesquisas agrônomicas objetivam avaliar o desempenho global da cadeia de produção em termos de energia, efeitos agrícolas e ambientais (CAPPONI et al., 2012). Segundo Berglund & Borjesson (2006) a produção de biogás é um meio promissor de produzir energia a partir de recursos renováveis e de alcançar vários benefícios ambientais, sendo uma fonte de energia que utiliza uma tecnologia que está bastante madura.

A produção de energias renováveis, a digestão anaeróbia da matéria-prima de biomassa orgânica de resíduos é amplamente reconhecida como um processo maduro e rentável como uma valiosa fonte de energia renovável primária através da produção de biogás (CONVERTI et al., 2009).

Bioenergia de biomassa, derivados de fontes vegetais ou animais, é uma energia alternativa limpa com grande potencial de conservação de energia (CHANG et al., 2011). A matéria orgânica é a fonte de alimento para as bactérias produtoras de metano.

O biogás proveniente da digestão anaeróbia além de reduzir os impactos ambientais das fontes poluidoras, também constitui uma fonte de energia alternativa (SALOMON, 2007).

Conforme House (2007) quatro ingredientes são necessários para a produção de biogás:

1. Matéria Orgânica;
2. Bactérias;
3. Condições anaeróbias;
4. Calor.

A crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Kyoto, a implementação do MDL e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como a crescente elevação do preço dos combustíveis convencionais, foram fatores que contribuíram para pesquisas e investimentos na produção de energia a partir de novas fontes alternativas, as quais possibilitem a redução de impactos ambientais bem como um atrativo financeiro, destacando-se o biogás que até pouco tempo era considerado apenas um subproduto da digestão anaeróbia, passando a ser encarado como uma fonte de energia (SALOMON, 2007).

A planta de produção de energia renovável através da geração de biogás somente se tornará sustentável a longo prazo, quando se tornar economicamente viável.

A concentração de metano presente no biogás é que determina o seu potencial energético, ou seja, o poder calorífico do gás, sendo que essa quantidade de metano presente no biogás varia dependendo da fonte geradora (SALOMON, 2007), sendo a produção deste gás o resultado de vários produtos químicos e processos físicos que ocorrem em um reator (MUHA et al., 2012). Ainda, a produção de biogás muda de acordo com a composição dos resíduos, pois depende do teor de carbono disponível na carga orgânica biodegradável (MANNA et al., 1999). É importante destacar que certas condições adequadas são necessárias para a ocorrência do biogás, tais como pH, temperatura, ausência de oxigênio (LEGGETT et al., s/d).

2.6.1 Benefícios do biogás

Gaspar (2003) destaca que as opções de utilização do biogás são muito extensas, demonstrando que o biogás pode ser utilizado como gás doméstico para uso culinário além de alimentar lampiões a gás. Esse tipo de fonte ainda proporciona o funcionamento de um motor, um pequeno moinho ou uma geladeira a gás, descaroçadeira de algodão, uma chocadeira; secadores de grãos; geradores de energia elétrica entre outras utilizações. Salomon (2007) relata que a utilização de biogás leva a uma alta contribuição na solução dos problemas de sustentabilidade ambiental, pois, reduz os possíveis impactos que a fonte poluidora poderia gerar, se esses resíduos não fossem adequadamente tratados. Conforme CENBIO (2001) a produção de energia elétrica a partir de biogás apresenta as seguintes vantagens:

1) Para as estações de tratamento de esgotos, gerenciadoras de aterros e outras:

- Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária;
- Possibilidade eventual de venda de eletricidade à rede;
- Possibilidade de uso de processos de cogeração, ou seja, a geração de eletricidade tem como subproduto calor, a ser usado no tratamento do esgoto, ou mesmo, ser vendido à terceiros;

2) Para a sociedade:

- Geração de empregos e eliminação ou redução de subempregos;
- Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável que vem sendo tratada como resíduo;
- Colaboração para a viabilidade econômica do saneamento básico.

3) Para o meio ambiente:

- Redução das emissões de metano para a atmosfera, pois este é um importante gás de efeito estufa. O seu potencial de aquecimento global é muito maior que o de CO₂;
- Redução do consumo de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo efeito estufa;

- Redução na geração de odor para as vizinhanças, de chorume e de contaminação do lençol freático;
- Melhoria nas condições dos lixões, que representam mais de 70% da condição de disposição nacional do lixo.

4) Para as prefeituras:

- Possibilidade de receita extra, proveniente da energia gerada com biogás e vendida às concessionárias;
- Contribuição para a viabilidade econômica do tratamento do lixo;
- Menor rejeição social das instalações de saneamento, uma vez que elas passam a ser gerenciadas de forma melhor, representando um exemplo a ser seguido.

Através da Tabela 5 pode-se constatar os benefícios do biogás relacionando a equivalência de 1m³ de biogás com os outros tipos de combustíveis, conforme dois diferentes autores.

Tabela 5 - Características do biogás

Combustível	Deganutti et al. (2002)	Nogueira (1986)
Gasolina	0,6 L	0,61 L
Querosene	0,57 L	0,62 L
Óleo diesel	0,55 L	0,55 L
Gás liquefeito	0,45 kg	1,43 kg
Etanol	0,79 L	0,8 L
Lenha	1,538 kg	3,5 kg
Energia elétrica	1,428 kwh	----

Fonte: Deganutti *et al.* (2002) & Nogueira (1986).

2.7 Biodigestor

Para analisarmos a todos os aspectos da digestão, precisamos encontrar o melhor arranjo possível de equipamentos com o que é fornecido pela realidade da indústria em questão. Existe uma forte dependência das características físicas, químicas e biológicas dos substratos com todos os equipamentos utilizados para a

obtenção de energia das matrizes. O número de combinações de equipamentos necessários para esse tipo de projeto é realmente muito grande e, uma análise das realidades do caso específico faz-se necessária para a restrição de equipamentos e uma escolha assertiva para a realidade do caso.

Por questões financeiras e de compatibilidade entre equipamentos, a o fornecimento de equipamentos para a construção de usinas de biogás envolve um único fornecedor denominado fornecedor principal. Apesar dessa vantagem, quem adquire o sistema tem pouca influência sobre os detalhes técnicos do projeto por conta dos conjuntos já padronizados e sem flexibilidade na configuração dos equipamentos. Optar por uma construção "personalizada" implica em praticamente envolver vários fornecedores como por exemplo, um fornecedor para o contrato de engenharia e fornecedores para o contrato de execução para as adaptações e personalizações. A questão que isso implica é o risco envolvido da entrada em operação e dos testes de desempenho.

2.7.1 Teor de matéria seca

O teor de matéria seca define a consistência dos substratos o que torna possível estratificar a classificação básica da tecnologia de biogás em técnicas secas e úmidas. Utilizando essa separação de processos, podemos dizer também que substratos úmidos são bombeados para digestão e substratos secos são empilhados para os processos de digestão anaeróbia. Não existe um limiar bem definido que se diz quando usaremos digestão úmida e digestão seca.

A digestão seca foi indexada a determinadas condições definidas em publicação de apoio do Ministério do Meio Ambiente da Alemanha, tendo como fonte a Lei Alemã de Energias renováveis (EEG), de 2004. Tendo definido um teor de secos de no mínimo 30% (base em massa) no biodigestor. A digestão úmida utiliza outros parâmetros para a definição como por exemplo um teor de matéria seca de até 12% (em massa). Com base em experiências já ocorridas desde o vigor desses parâmetros, é válido o limite de 15% em massa para ser bombeado. Óbvio que se constitui um valor qualitativo e que cada substrato deve ser analisado anteriormente para se conferir os parâmetros. A título de informação, alguns substratos, com um alto teor de substâncias solúveis, possíveis de serem bombeados para teores de massa seca de 20% em massa, como por exemplo, restos de alimentos dispersos por

veículos tanque. Por outro lado, cascas de frutas e legumes são empilháveis mesmo possuindo 10% a 12% de massa seca em massa.

A maioria das usinas de biogás faz uso da digestão úmida, realizada em reservatórios circulares. Desde 2004 ocorreu a maturidade comercial das usinas de digestão seca (ou as empilháveis) que é utilizada basicamente para a fermentação de biomassas dedicadas.

2.7.2 Tipo de Alimentação no Biodigestor

A periodicidade de alimentação de uma usina geradora de biogás determina em grande parte a disponibilidade do material a ser digerido fresco para que haja a ação biológica culminando na geração do biogás. A alimentação possui 3 estados classificatórios: contínua, semicontínua e descontínua ou em batelada.

2.7.3 Contínua e Semicontínua

Nesses dois modos de classificação utilizamos técnicas de fluxo contínuo e a técnica combinada de fluxo contínuo e armazenamento, entretanto a segunda possuindo uma aplicabilidade muito limitada por motivos técnicos e econômicos. A semicontínua uma carga de substrato não fermentado é introduzida no biodigestor no mínimo uma vez a cada turno de trabalho comprovando que a alimentação em cargas reduzidas várias vezes ao dia oferece vantagens.

2.7.4 Fluxo Contínuo

É a técnica que a maioria das usinas de biogás utilizava. O substrato é bombeado várias vezes por dia de um tanque reserva ou de um tanque secundário para o biodigestor. A mesma quantidade bombeada para o biodigestor é expelida para o reservatório de biofertilizantes.

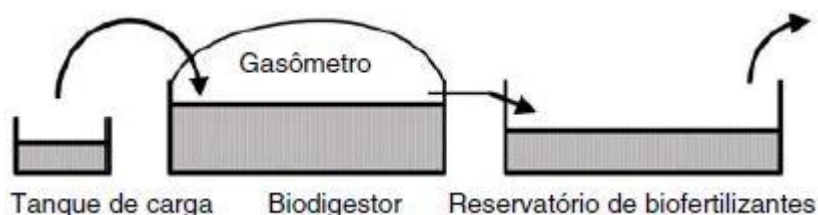


Figura 7: Fluxo Contínuo

Fonte: Guia Prático do Biogás (2013).

2.7.5 Fluxo Contínuo com Armazenamento Combinado

Nessa modalidade, existe o fluxo contínuo e um armazenamento de biofertilizantes o biogás que chega no reservatório pode ser coletado e aproveitado. Fazendo do reservatório um tanque pulmão. Ao fim do tanque pulmão existe um reator de fluxo contínuo. O reator provê também substrato. Essa técnica permite uma produção de gás uniforme.

2.7.6 Alimentação Descontínua

Nesse processo, o reservatório é preenchido completamente com substrato fresco e fechado hermeticamente em sequência. O substrato se mantém intacto até o fim do processo e conseqüentemente esvaziado para mais um ciclo de digestão com uma pequena parte do substrato anterior para inocular os agentes orgânicos na biomassa. Para otimização da velocidade do reservatório de batelada, se faz imperativo reservatórios de armazenamento e depósito. A taxa de produção também varia ao longo do processo. Por conta da intermitência não é possível atingir os níveis de produção e qualidade com apenas uma unidade biodigestiva precisando de um conjunto de biodigestores com intervalos de tempo entre si.

2.7.7 Modo de processamento

Independente da alimentação, as etapas de processamento se dividem em 4:

1. Gestão do substrato (Entrega, armazenamento, tratamento, transporte e carregamento).
2. Obtenção do Biogás.

3. Aproveitamento, preparo e descida de biofertilizantes.
4. Armazenamento, Purificação e utilização do biogás.

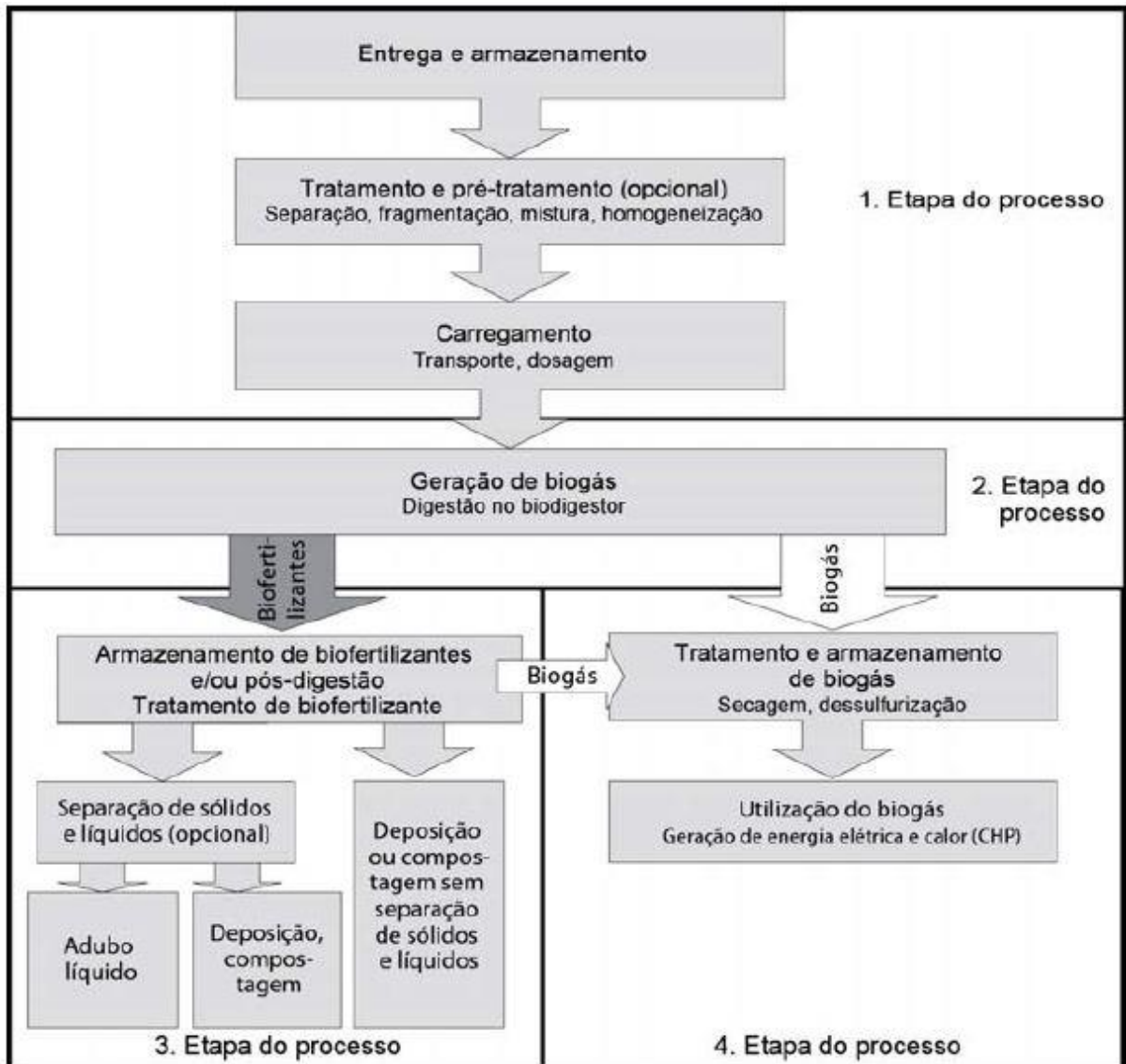


Figura 8: Diagrama genérico do processo de geração do biogás

Fonte: Guia Prático do Biogás (2013).

As 4 etapas não são independentes, a interdependência é um determinante para a conclusão do processo, principalmente entre a segunda e quarta etapa pois a segunda normalmente produz o calor necessário para a ocorrência da quarta.

O substrato disponível é o maior fator de definição da utilização dos equipamentos técnicos. O dimensionamento de todos os equipamentos e volumes dos reservatórios são determinados pela quantidade de substrato. A tecnologia adotada

no projeto é totalmente dependente da qualidade do substrato a ser utilizado (teor de matéria seca, estrutura, origem, etc.). A composição do substrato pode definir algumas medidas a serem tomadas para facilitar os processos, tais como a separação de materiais estranhos ou a mistura do substrato com águas para facilitar o bombeio do mesmo. Por questões de planejamento, é necessário pensar na higienização caso seja necessário.

2.7.8 Tipos de Biodigestor

O processo de fermentação determina qual o tipo de biodigestor a ser utilizado. Na digestão de substrato, a mistura completa, a técnica de fluxo pistonado ou processos pistonados podem ser utilizados.

2.7.9 Processo com Mistura Completa

Temos como exemplos, os reatores de mistura completa cilíndricos em posição vertical. Os biodigestores são compostos de um reservatório com fundo de concreto e laterais podendo ser tanto de concreto armado ou aço. O reservatório pode tanto ser posicionado totalmente sobre o solo, parcial ou totalmente enterrado.

Na parte superior do reservatório é montada uma cobertura impermeável a gás, que pode ser constituída de formas diferentes, de acordo com as exigências. As mais usuais são coberturas de lona ou concreto. A totalidade da mistura é responsável de agitadores posicionados no interior do reator ou em suas laterais.

2.7.10 Fluxo Pistonado

Também conhecidos como processos de fluxo em tanque, é tirada vantagem do recalque do substrato fresco, introduzindo para produzir um fluxo em forma de pistão por meio de um biodigestor com seção transversal circular ou retangular. DE maneira genérica, a agitação de acordo com o sentido do fluxo é realizada por meio de eixos dotados de palhetas ou por uma canalização de fluxo construída especificamente para essa configuração.

O fluxo pistonado divide os biodigestores em duas classes: Horizontais e verticais. A indústria agrícola tem como preferência a variante horizontal. Os biodigestores de fluxo vertical não possuem tanta expressividade em seu uso sendo apenas em situações bastante específicas.

Existem fábricas que fornecem os tanques de biodigestão, principalmente os de aço e horizontais. Seu transporte é limitado pelo tamanho. O tanque tem a possibilidade de sua utilização como biodigestor principal para usinas de pequeno porte ou como um pré-digestor em usinas maiores, que possuem digestor principal com mistura completa. visando produções maiores, biodigestores horizontais também são operados em paralelo.

O fluxo pistonado reduz o risco de que o substrato não seja totalmente fermentado e, mesmo assim, seja expelido pelo digestor garantindo o tempo de retenção necessário para todo material.

2.7.11 Tratamento em Batelada

Essa técnica é exclusiva de usinas móveis do tipo container e a digestores de baia estacionários. Os biodigestores de baia confeccionados em concreto armado possuem amplas aplicações na fermentação de silagem de milho, gramíneas e outros substratos que podem ser despejados.

Nesse processo, a biomassa preenche os biodigestores que são fechados hermeticamente. A matéria biológica (inóculo) é adicionada ao substrato fresco que promove seu aquecimento na primeira fase onde é adicionado ar ao digestor. O processo de compostagem libera calor. Com o atingimento da temperatura ideal, o fornecimento de ar é desligado. O oxigênio aplicado é todo consumido e, em sequência os microrganismos entram em ação convertendo a biomassa em biogás. O biogás é capturado pela tubulação coletora de gás e transferido para o local de geração de energia.

2.7.12 Estrutura dos Biodigestores

Em suma, os biodigestores são compostos do reator de gás propriamente dito (Construído com isolamento térmico), um sistema de aquecimento, equipamentos de agitação e sistemas de retirada de sedimentos e do substrato digerido.

Sua confecção é feita em aço, aço inoxidável ou concreto armado.

Um ambiente com muita umidade preenche os poros da estrutura garantido a impermeabilidade aos gases. Essa umidade é proveniente da água contida no substrato e no biogás. Os biodigestores são moldados em concreto in loco ou montados com peças pré-moldadas. Uma vez que as condições físicas do local sejam

totalmente favoráveis, é possível enterrar o reservatório de concreto parcial ou totalmente. A cobertura do reservatório pode ser de concreto.

Reservatórios de aço e aço inoxidável são posicionados e conectados a um alicerce de concreto. Como insumos pode-se citar tiras de aço bobinado e chapas de aço soldadas ou parafusadas. Os pontos parafusados demandam impermeabilização. Seu posicionamento é sempre acima do solo. Em sua maioria, a construção do teto tem a utilidade de gasômetro e recoberta por uma lona impermeável a gases.

2.7.13 Mistura e Equipamentos de Agitação

O conteúdo do biodigestor deve sempre estar bem agitado por várias razões:

- Inoculação do substrato fresco com o líquido em atividade biológica no digestor;
- Distribuição igual de calor e de nutrientes no digestor;
- Prevenção e eliminação de camadas de sedimentos e sobrenadante,
- Extração adequada do biogás do substrato.

São tidos como intensificadores do efeito da agitação fenômenos como introdução do substrato fresco, a ascensão de bolhas de gás e a convecção térmica são fatores que promovem a mistura do substrato em fermentação, mesmo que seja em um grau reduzido.

O processo de mistura pode ser por equipamentos no biodigestor como por exemplo agitadores, bombas posicionadas externamente ou pelo soprimento de gás no biodigestor.

Os agitadores são classificados como dispositivos de propulsão e mistura. De acordo com a viscosidade e ao teor de matéria sólida que sua aplicação é condicionada. Não é rara a combinação de propulsão e mistura concomitantes uma vez que essa associação é capaz de intensificar o efeito da agitação.

A sazonalidade de acionamento dos agitadores pode ser em modo contínuo e intermitente. É comprovado de forma empírica que os intervalos de agitação devem ser otimizados de acordo com os casos, com base nas peculiaridades da usina de biogás tomando como parâmetros fatores como as características do substrato, dimensões do reservatório, a propensão à formação de sobrenadante e outras questões. Após o início da operação da usina, a segurança determina que se deve agitar o substrato por mais tempo e com mais frequência que o normal. Os resultados

obtidos através desse teste de stress têm por objetivo otimizar a duração e frequência dos intervalos e o ajuste dos agitadores.

Biodigestores verticais com a operação baseada no princípio do reator agitado possuem usualmente agitadores de motor submersível. Esse tipo de agitador tem duas classificações, o de baixa agitação com uma grande hélice dotada de duas pás e o de alta rotação, com hélice de duas ou três pás. Os agitadores são tracionados por motores elétricos sem engrenagem ou com redução, operando sob o princípio da propulsão. A carcaça é protegida por camada anticorrosiva, é impermeável em ambiente sob pressão. Por esse motivo, o agitado pode atuar submerso e, inclusive, ser arrefecido pelo substrato.

Outra forma de promover a agitação dos substratos são os agitadores de eixo longo, montados obliquamente no biodigestor. O motor é localizado externamente ao digestor com o eixo passa pelo seu teto ou, no caso de teto de lona, pela área superior da parede, com tratamento impermeabilizante a gases.

Os agitadores axiais são montados no eixo localizado no centro do teto do digestor. A velocidade do motor de acionamento montado externamente ao biodigestor sofre uma redução para poucas rotações por minuto. É gerada uma corrente contínua que desce pelo centro e sobe próximo às paredes.

Os agitadores de palhetas ou carretéis possuem eixo longo e com o movimento lento. O efeito de agitação se dá pelo amassamento do substrato, comprovando sua eficiência com substratos ricos em matéria seca. Esses agitadores são aplicados em digestores com reator vertical e também em digestores horizontais, também conhecidos como biodigestores de fluxo pistonado.

Os biodigestores horizontais possuem uma estrutura que exige a montagem do eixo de agitação na horizontal também, sendo a agitação realizada pelas pás posicionadas ao longo do eixo. O fluxo pistonado horizontal é garantido graças ao abastecimento posterior do digestor com substrato.

2.8 Eficiência da Primeira Lei da Termodinâmica

Um trabalho termodinâmico sempre é associado aos balanços de massa e energia assim como suas leis fundamentais. Em sua primeira abordagem de um processo termodinâmico é necessário definir um volume de controle, assim como, conhecer as grandezas que ali estarão envolvidas, ou seja, quanto de calor (Q) será

utilizado para produzir um determinado trabalho (W). A energia será transferida pela massa que percorre o volume de controle, essa transferência ocorre por conta da mudança dos valores das propriedades termodinâmicas onde a energia interna, potencial, cinética, térmica e o trabalho podem ser representados pela Equação abaixo:

$$(\dot{Q}_{ent} - \dot{W}_{sai}) + (\dot{m}_{ent}h_{ent} - \dot{m}_{sai}h_{sai}) + (gz_{ent} - gz_{sai}) + \left(\frac{V_{ent}^2 - V_{sai}^2}{2}\right) = 0 \text{ (Eq.2.7)}$$

Simplificando, o balanço de massa e energia dentro de um volume de controle é dado pelas transformações da energia interna do sistema. Apesar de tudo, as transformações das energias: cinética e potencial não representam grande influência nessa análise e por isso a equação anterior pode ser simplificada de acordo com o que temos abaixo:

$$(\dot{Q}_{ent} - \dot{W}_{sai}) + (\dot{m}_{ent}h_{ent} - \dot{m}_{sai}h_{sai}) = 0 \text{ (Eq.2.8)}$$

De modo que o cálculo da Eficiência de Primeira Lei para um ciclo termodinâmico pode ser expresso pela equação abaixo:

$$\eta_{térmico} = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{\dot{Q}_{entrada}} \text{ (Eq.2.9)}$$

Utilizando o cálculo de eficiência da Primeira Lei para um ciclo combinado, a mesma eficiência fica expressa pela equação abaixo:

$$\eta_{ciclo\ combinado} = \dot{W}_{gás} + \frac{\dot{W}_{vapor} - \dot{W}_{bombas}}{\dot{Q}_{entrada}} \text{ (Eq.2.10)}$$

As transformações cíclicas do estado de uma determinada matéria, de modo que ao reiniciar o ciclo deste sistema as condições físicas sejam todas reestabelecidas para que um seja chamado de processo reversível (PEREIRA, 2018 apud MORAN et al, 2011). Quando é lada em consideração a Segunda Lei, é estabelecida pelo aumento da entropia (s), (PEREIRA, 2018 apud BORGNAKKE e SONNTAG, 2013). Durante os processos termodinâmicos, uma parcela de energia se perde em virtude da geração dessa propriedade. Conhecido como trabalho irreversível (W_{irrev}), comparado este trabalho com outro que seja reversível, neste caso exceto para bombas e compressores, a conclusão será:

$$W_{irrev} < W_{rev} \text{ (Eq.2.11)}$$

‘A irreversibilidade possui importância muito grande quando o objetivo é calcular a eficiência real dos ciclos de potência. Até então, tudo que era conhecido era a eficiência de Carnot, que por sua vez atingia o valor máximo de rendimento de um processo termodinâmico. Existem dois tipos de irreversibilidade uma que ocorre no interior do sistema e outra que ocorre aos arredores da fronteira, obviamente ambas diminuem a eficiência do sistema. As irreversibilidades são susceptíveis ao surgimento das seguintes formas:

- Transferência de calor através de uma diferença de temperatura finita.
- Expansão não controlada de um fluido para uma pressão mais baixa.
- Reação química espontânea.
- Mistura espontânea de matéria em diferentes composições ou estados.
- Atrito, fricção-deslizamento, bem como atrito no fluxo de fluidos.
- Fluxo de corrente elétrica através de uma resistência.
- Magnetização ou polarização com histerese.
- Deformação inelástica.

(MORAN et all, 2011).

As eficiências de cada componente dos ciclos combinados, são obtidas com base nos conceitos termodinâmicos apresentados anteriormente, ou a partir do diagrama $T \times s$ do ciclo de Brayton e de Rankine (PEREIRA, 2018) representados pelas Figuras 10 e 11 e estas eficiências podem ser calculadas utilizando as expressões abaixo:

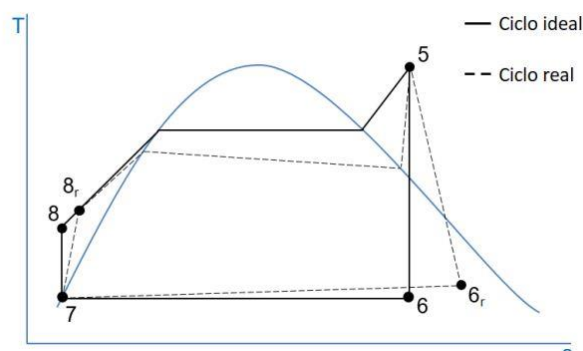


Figura 9: Diagrama Ts

Fonte: Pereira (2018).

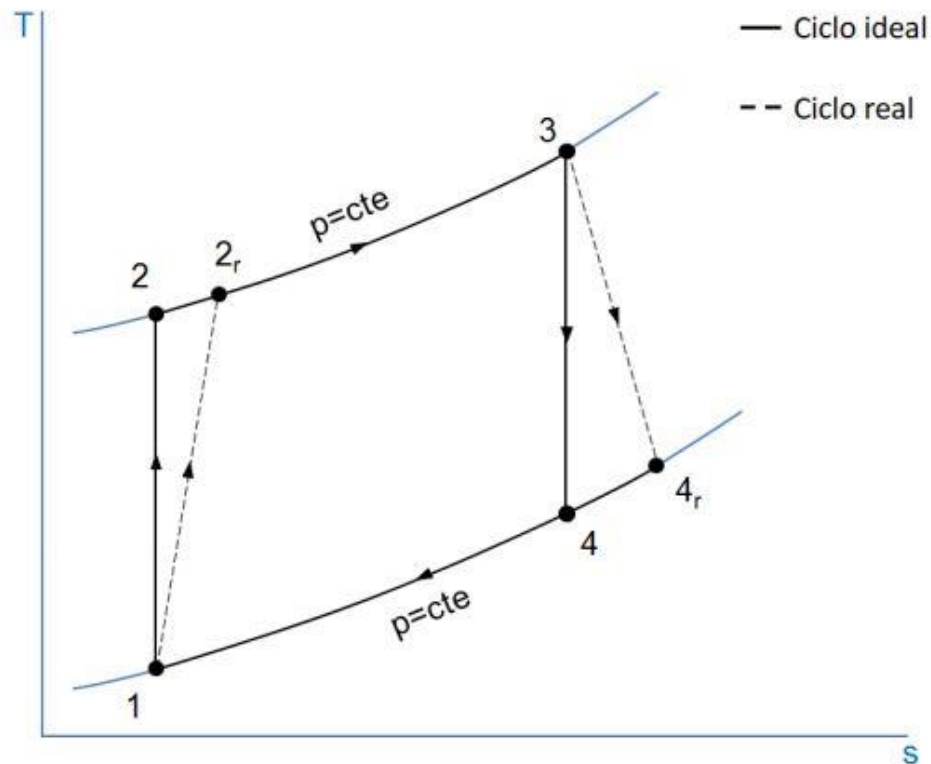


Figura 10: Diagrama Ts do ciclo de Brayton

Fonte: Pereira (2018).

$$\text{Compressor : } \eta_c = \frac{\dot{W}_c/\dot{m}}{(\dot{W}_c/\dot{m})_r} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2r} - h_1} \quad (\text{Eq.2.12})$$

$$\text{Turbina de expansão: } \eta_{tg} = \frac{(\dot{W}_{tg}/\dot{m})_r}{\dot{W}_{tg}/\dot{m}} = \frac{h_3 - h_{4r}}{h_3 - h_4} \quad (\text{Eq.2.13})$$

$$\text{Caldeira: } \eta_{cal} = \frac{(\dot{Q}_{cal}/\dot{m})_r}{\dot{Q}_{cal}/\dot{m}} = \frac{h_5 - h_{8r}}{h_5 - h_8} \quad (\text{Eq.2.14})$$

$$\text{Turbina a vapor: } \eta_{tv} = \frac{(\dot{W}_{tv}/\dot{m})_r}{\dot{W}_{tv}/\dot{m}} = \frac{h_5 - h_{6r}}{h_5 - h_6} \quad (\text{Eq.2.15})$$

$$\text{Condensador: } \eta_{con} = \frac{\dot{Q}_{con}/\dot{m}}{(\dot{Q}_{con}/\dot{m})_r} = \frac{h_6 - h_7}{h_{6r} - h_7} \quad (\text{Eq.2.16})$$

$$\text{Bomba: } \eta_b = \frac{\dot{W}_b/\dot{m}}{(\dot{W}_b/\dot{m})_r} = \frac{h_8 - h_7}{h_{8r} - h_7} \quad \eta_b = \frac{v_7(p_{8r} - p_7)}{h_{8r} - h_7} \quad (\text{Eq.2.17})$$

2.9 Ciclo Brayton

O ciclo Brayton pode ser visualizado e compreendido através do esquema e do diagrama PV mostrados na Figura 12. O primeiro estágio do processo (a→b) é a compressão isentrópica de ar que, uma vez submetido a elevadas pressões, segue para o(s) combustor(es), onde acontece a queima, aqui considerada como uma absorção de energia isobárica (de mesma pressão) do calor (Q_{ent}), equivalente à quantidade de calor produzida pela combustão no processo real (estágio b→c). Na turbina (estágio c→d), os gases produzidos na queima passam por uma expansão isentrópica, fazendo girar a turbina e produzindo trabalho mecânico. Por fim, ocorre o resfriamento isobárico do ar (d→a), correspondente à expulsão dos gases de exaustão a elevadas temperaturas e à obtenção de novas porções de ar à temperatura ambiente. (VIEIRA,2016)

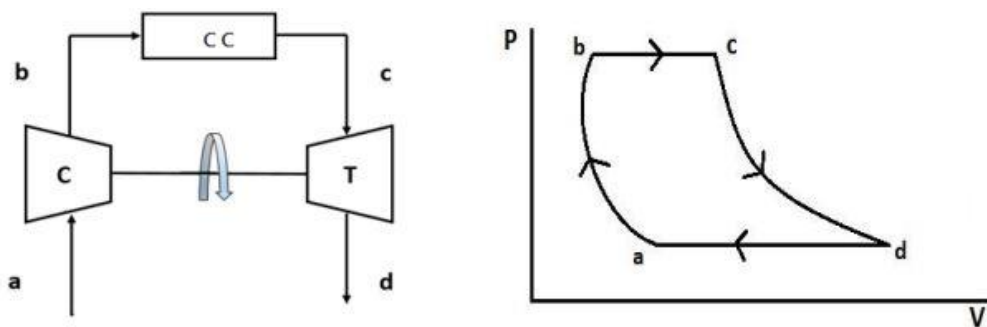


Figura 11: Esquemática do Ciclo Brayton, à esquerda. Diagrama PV, à direita.

Fonte: Vieira (2016).

Em um primeiro contato, para se calcular as irreversibilidades, e as eficiências, foi necessário conhecer bem o processo, levantar seus dados termodinâmicos e pré-estabelecer os volumes de controle dos equipamentos. Os pontos 1 e 2 da Figura 13, situada abaixo, nesta ordem, são: a admissão e a saída da vazão mássica de ar do compressor. O ponto 2 representa a admissão de ar na câmara de combustão que possui parte de combustível sendo incluído simultaneamente. O ponto 3 é a saída dos gases de exaustão da câmara de combustão para a turbina a gás. O ponto 4 representa a descarga para a caldeira de recuperação. (PEREIRA,2018)

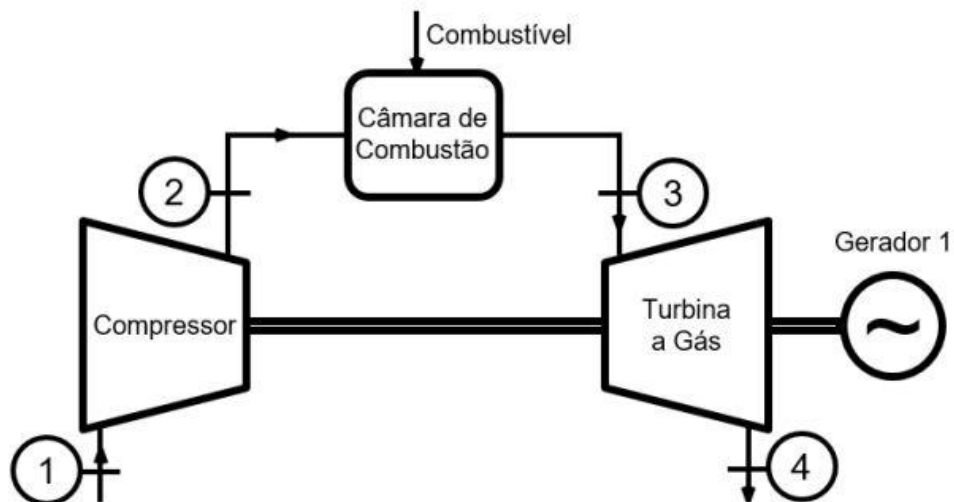


Figura 12: Constituição Ciclo Brayton

Fonte: Pereira (2018).

De fato, os cálculos ocorrem a partir do momento em que se encontra o número de mols total dos reagentes e dos produtos para que possa ser feito o balanço estequiométrico da combustão. Para se descobrir o número de moles total dos reagentes, no caso do gás natural foi utilizada a equação de Clapeyron. De modo específico, algumas entalpias associadas a determinadas temperaturas dos reagentes e dos produtos utilizadas para fazer o balanço estequiométrico, em alguns casos, normalmente, não são encontradas em literaturas muito comuns, com exceção dos gases ideais. (PEREIRA,2018)

3 ESTUDO DE CASO

O presente trabalho consiste em analisar a eficiência térmica da planta de cogeração da cervejaria usada como objeto de estudo da forma que é alimentada e sob a hipótese de trocar o combustível utilizado (Gás Natural) para o Biogás, oriundo

do potencial processo de decomposição do subproduto cervejeiro, o bagaço de malte, e comparar os resultados obtidos.

Para isso, coletou-se os consumos totais de Energia Elétrica, Vapor e Geração de Bagaço de Malte de cada mês dos anos de 2015 até 2017, de uma cervejaria que atua no Brasil. A partir deles gerou-se um valor médio de consumo de energia elétrica e térmica para os meses de Janeiro a Dezembro e a produção média diária por mês de Bagaço de Malte.

Além dos itens descritos no parágrafo anterior, apurou-se os valores de vazão mássica, temperatura, pressão e entalpia dos fluidos atuantes na usina de cogeração, através dos pressostatos e termostatos conectados no sistema de automação de operação, bem como o manual técnico dos equipamentos.

Como esse trabalho não foi embasado em testes empíricos, os resultados do potencial valor de geração de biogás foram realizados através dos dados encontrados na literatura, bem como sua composição e valor energético.

Tendo os números, realizou-se o balanço estequiométrico da combustão das substâncias usadas como combustíveis e ar atmosférico seco, considerando a quantidade de excesso de oxigênio necessária para tratar o problema como um caso de combustão completa.

A partir daí desenhou-se o diagrama que representa a usina de cogeração e fez-se o balanço de massa e energia em cada componente do seu funcionamento.

Por fim realizou-se o cálculo da eficiência térmica dos dois sistemas. Como a geração de biogás não é constante, ou seja, tem seu consumo médio variado mês a mês devido ao efeito de sazonalidade do mercado cervejeiro, fez-se a análise para cada um dos valores obtidos por mês.

A cervejaria estudada tem como função principal a produção, envase e distribuição da cerveja. Dessa forma, todos os processos ocorridos desde o recebimento da matéria prima até a distribuição do produto já embalado necessitam de energia na forma de calor, frio e elétrica. Tendo em vista todo o desperdício de energia que poderia ser reaproveitada caso cada uma das demandas fosse atendida separadamente e, conseqüentemente, a economia gerada no processo de geração, o parque industrial dispõe de uma usina de cogeração responsável por atender a

demanda uma parcela da demanda de energia elétrica e a totalidade de vapor da unidade.

3.1 Demandas

Na Figura 14, pode-se analisar o gráfico e ver o perfil de consumo médio de vapor por mês dos anos 2015-2017 na cervejaria ao longo dos 3 últimos anos. O vapor é utilizado, em sua grande maioria, na preparação do mosto e de aquecimento do sistema de pasteurização. Além dessa aplicação, parte do subproduto gerado é composto de fermento e quando seco possui bom valor de mercado. Esse processo de secura também é feito através do vapor.

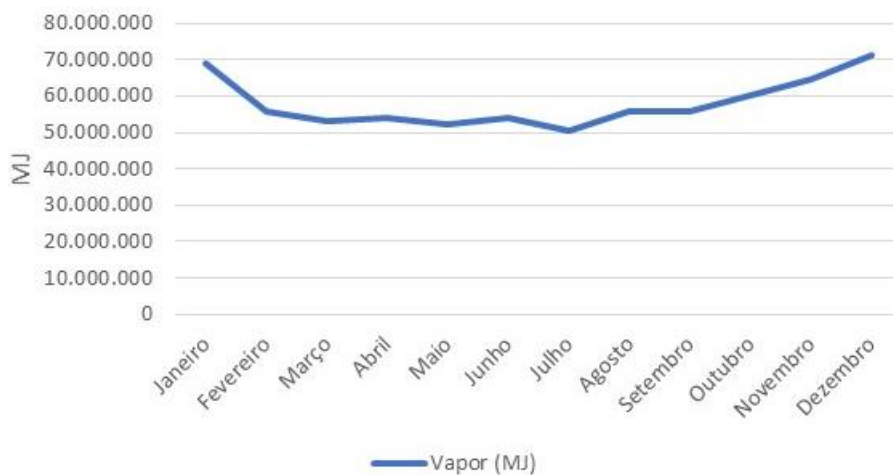


Figura 13: Geração de Vapor

Fonte: Cervejaria estudada (2019).

A energia elétrica consumida pode ser dividida em duas partes. A primeira parte abrange todo o sistema de iluminação da cervejaria, máquinas de transporte, sensores, bombas para transferência dos líquidos e sistema pneumático; a segunda parte abrange especificamente os compressores responsáveis por comprimir a amônia no sistema de frio. Este tem atuação em toda a fase adegas, onde o mosto proveniente da brassagem é fermentado e maturado a temperaturas próximas dos 0 graus, demorando cerca de 14 dias para ficar pronto para o envase. A rede de frio apesar de ser alimentada por amônia, tem como fluido refrigerante o etanol,

caracterizando um sistema indireto de resfriamento. Na Figura 15 pode-se observar o consumo médio de energia elétrica por mês dos anos 2015-2017.

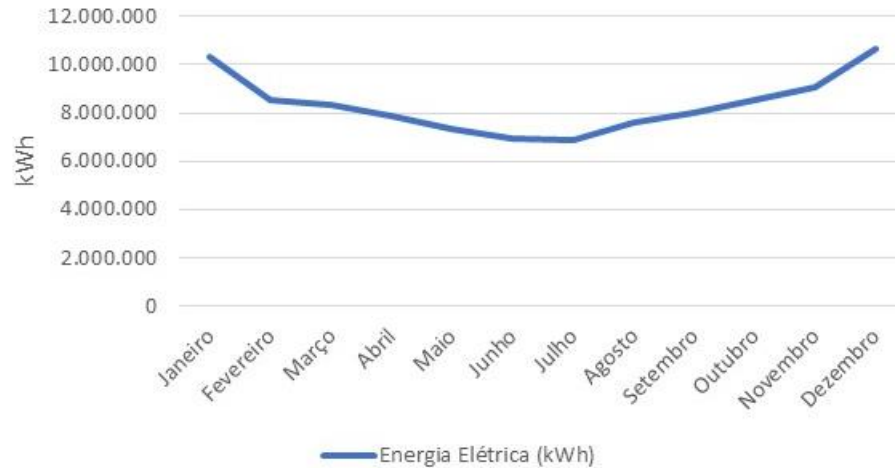


Figura 14: Consumo de Energia Elétrica

Fonte: Cervejaria estudada (2019).

Pode-se perceber pela Figura 16, o gráfico formado a partir dos dois gráficos acima justapostos, que o consumo acompanha uma curva semelhante a uma banheira ou rampa de skate. Isso é devido a sazonalidade do mercado de cervejas, onde no início do ano tem-se uma grande demanda dos consumidores devido às férias e carnaval, enquanto no fim do ano o aumento é justificado pelas festividades de fim de ano. Por tanto, qualquer que seja o projeto envolvido em uma cervejaria deve-se levar em conta esse comportamento do mercado, evitando o subdimensionamento dos sistemas baseados em comportamentos médios lineares.

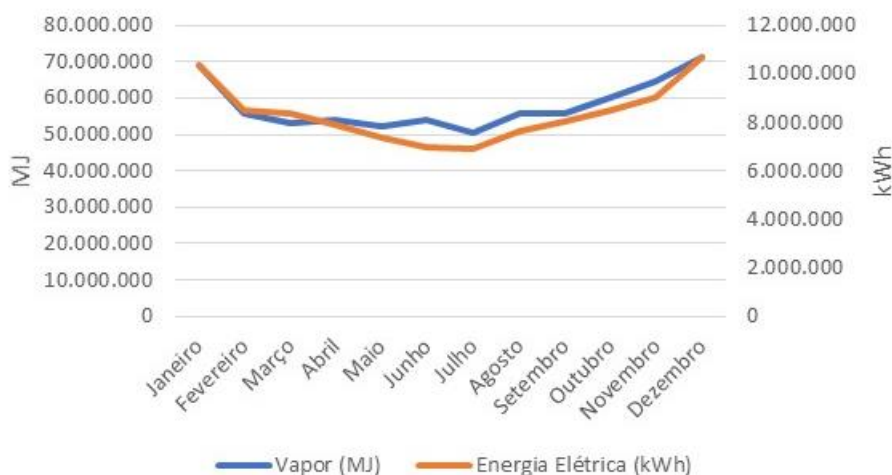


Figura 15: Geração de Vapor e Consumo de Energia Elétrica

Fonte: Cervejaria Estudada (2019).

3.2 Produção do Bagaço de Malte

3.2.1 Obtenção do Bagaço de Malte

O subproduto mais abundante gerado na produção de cerveja é o bagaço de malte. Sua produção dar-se-á durante toda etapa da brassagem, sendo assim, é importante explicar todo o processo desde o recebimento do malte até a geração do bagaço. O processo de malteação dos cereais não serão descritos aqui, visto que a cervejaria estudada compra o malte, não sendo responsável pela sua produção.

3.2.2 Beneficiamento do Malte

O malte chega na cervejaria através de um caminhão carregado que é inclinado por uma rampa pneumática e despeja toda a matéria prima num reservatório. A alimentação dos silos com os grãos maltados é feita através de elevadores de copo e esteiras de transporte, todavia esse produto não pode ser estocado de uma vez, visto que possui impurezas físicas como pedras, terra, pó e palha.

O processo de purificação dos grãos antes da etapa de maceração é chamado de beneficiamento, mas antes de ser estocado ele passa por uma limpeza de particulados leves como pó e palha e possíveis materiais metalizados. Sua extração é feita através da sucção do ar de um ventilador acoplado a um filtro manga, cuja a

finalidade é reter os particulados sólidos extraídos pela corrente de ar; enquanto que os materiais metalizados são separados através da ação de imãs.

Após a estocagem o material já pode ser beneficiado e isso ocorre conforme as demandas de produção de mosto. A primeira parte do processo se chama Limpeza e é uma sequência de peneiramento que tem como principal função eliminar as partículas grosseiras presentes no malte, através de uma dada granulometria definida como imprópria e a retenção do malte numa segunda peneira através de uma outra peneira com granulometria menor afim de eliminar grãos moídos, quebrados e outras sujeiras menores. Entretanto algumas impurezas cuja granulometria é igual à dos grãos passam dessa fase, sendo necessária uma segunda etapa.

A última etapa de beneficiamento do malte é chamada de despedradeira, e consiste numa peneira vibrante de arames com um sistema de sucção responsável por criar um leito de malte fluidificado, facilitando o seu deslocamento no sentido da inclinação da máquina. Por possuírem densidade maior, fluem no sentido contrário dos grãos devido a corrente de ar instalada. Após essa etapa o malte já está pronto para a fase de maceração, primeira etapa da brassagem.

3.2.3 Brassagem

A Brassagem começa pela etapa de maceração, nela ocorre a umidificação dos grãos de malte e conseqüentemente sua moagem. Nessa fase do processo a matéria prima entra num moinho cujo o interior possui sprayballs com a finalidade de umidificá-las através de esguichos de água. O controle no nível de umidade deve ser rigoroso, pois em conjunto com a distância adequada entre os rolos, é o que garante a retirada correta da casca dos grãos. Essa ação tem como finalidade liberar os nutrientes presentes no interior do malte para a devida quebra dos açúcares que serão usados na fermentação, além de servirem como elemento filtrante antes da etapa de fervura. A parte sólida, que confere viscosidade ao mosto, é que vai a vir ser o bagaço de malte.

Depois de macerado, o produto vai para a tina de mostura. É nessa etapa que se forma o mosto, o líquido com alto teor de açúcares que será fermentado. Durante essa fase são dosadas enzimas que atuarão nas quebras dos polissacarídeos presentes no malte, todavia cada enzima possui uma temperatura ótima de atuação e o seu efeito é desejado por tempo determinado, para que não haja formação de outras

substâncias indesejáveis ao processo. Para tal efeito, é necessária uma rampa controlada de temperatura por tempo de forma que ocorra as devidas ativações e desativações das enzimas no momento desejado. No fim do processo todas as enzimas estão inutilizadas e o mosto possui a quantidade de açúcar ótima para a fermentação.

Entre a tina de mostura e o cozinhador, o mosto passa por um processo de filtração sobre um leito do próprio bagaço de malte gerado na etapa de maceração. Nessa etapa, antes de ser bombeado para a fervura, o mosto é assentado no interior de uma tina de forma a homogeneizar o elemento filtrante, visando que o mesmo não sofra arraste para a fase seguinte. O líquido que passa pela primeira filtração é chamado de mosto primário. Depois dessa parte o bagaço passa por um processo de limpeza com água, que tem como objetivo retirar todos os nutrientes que estão presentes na sua massa. Essa mistura de água e nutrientes é chamada de mosto secundário. Enquanto o mosto caminha para a etapa de fervura no cozinhador, o bagaço é descartado e levado para armazenamento em silo.

O bagaço descartado na etapa da tina filtro é destinado como venda de subproduto para fabricação de ração animal e fertilizante. Apesar das etapas seguintes gerarem uma massa informalmente denominada torta, conhecida como trub, retirada no fim do processo whirlpool, para fins desse projeto será considerado apenas a massa do bagaço de malte formado nessa parte da brassagem. Na tabela 6 é demonstrada a geração média do subproduto por dia de cada mês ao longo dos anos de 2015-2017. Assim como as Figuras 14 e 15 revelam, pode-se perceber o comportamento sazonal da produção de cerveja evidenciados pelos números altos de subproduto de matéria prima elevados nos primeiro e último trimestres do ano, sendo os maiores valores em Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro, com média de 365 toneladas de bagaço, e o mínimo de 207 Toneladas em Julho.

Tabela 6 - Geração média do Bagaço de Malte diária mensalmente de 2015 até 2017

Meses	Ton / Bagaço dia
Janeiro	367

Fevereiro	353
Março	342
Abril	245
Maio	237
Junho	232
Julho	207
Agosto	257
Setembro	282
Outubro	343
Novembro	370
Dezembro	371

Fonte: Cervejaria Estudada (2019).

Na tina de cozimento onde o mosto é fervido através do vapor presente nas camisas de suas paredes. Para evitar um gradiente de temperatura o mosto é bombeado para um trocador de calor que se encontra em posição vertical e centralizado no interior do cozinhador. O fluxo do mosto tem um desenho convectivo, entrando por debaixo do casco-tubo e saindo pela parte superior. A temperatura do líquido nessa etapa chega aos 100 °C e tem como principal função a desativação de todas as enzimas que possam estar ainda ativas da tina de mostura. É nessa etapa que são dosados os lúpulos de amargor, logo no início do processo, e os lúpulos aromáticos, já no fim. Além de alta concentração de açúcar, o mosto possui muitas proteínas que foram usadas no processo de quebra das grandes cadeias de polissacarídeos, sendo indesejáveis para as etapas seguintes. Sendo assim, é dosado ácido fosfórico com o principal objetivo coagular essas substâncias e o fluxo convectivo é, também, de extrema importância nessa ação, garantindo a agitação necessária para a aglutinação as proteínas.

Por fim, tem-se o mosto pronto para ser fermentado mas com uma quantidade elevada de matéria morta, porém rica em nutrientes, conhecida como trub, coagulada e, antes que o líquido possa ser enviado para a fase de adegas, é necessário retirá-las. A separação mecânica de líquido e sólidos ocorre através de um equipamento chamado whirlpool, onde o mosto é bombeado para a parte superior de uma tina cuja a tubulação está posicionada tangencialmente, garantindo um trajeto espiral de preenchimento. A força centrífuga gerada empurra a parte líquida para as paredes enquanto o trub é decantado no fundo. Válvulas são acionadas para que ocorra o

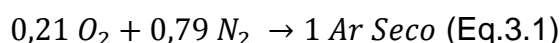
correto envio do mosto para a fermentação, de forma que as substâncias não voltem a ter contato. Por fim, o mosto é resfriado próximo de 0°C e o Trub retirado e enviado para o setor de meio ambiente junto do bagaço de malte.

3.3 Caracterização dos Gases

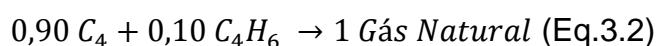
3.3.1 Estequiometria dos Gases de Combustão

A modelagem de uma equação de combustão é realizada através da estequiometria de oxidação dos combustíveis. Nesse processo as massas de cada elemento presente nos reagentes se conservam nos produtos. O resultado dessa reação oferece a quantidade mínima necessária de Oxigênio para a oxidação total dos combustíveis, um valor teórico chamado de Ar Estequiométrico. Em casos reais só essa quantidade não garante uma combustão completa e, por isso, aumenta-se a proporção de 50% à 100% na maioria dos casos. (Çengel, 2013)

Um mol de Ar Atmosférico seco contém 20,9% de Oxigênio, 78,1% de Nitrogênio e 1% de outros gases. Nos cálculos de combustão, pode-se tratar 0,9% de outros gases como N_2 e 0,1% como O_2 . (Çengel, 2013), como pode ser verificado através da equação (Eq.7). Villela (2007) diz que 53% de excesso de Oxigênio é suficiente para considerar uma combustão completa de combustível. Por fins de praticidade no cálculo, esse trabalho considera 50%.



O Metano é a composição majoritária do Gás Natural e contém pequenas quantidades de Etano, Propano, Hidrogênio, Hélio, Dióxido de Carbono e outros gases (Çenge, 2011). O presente trabalho considera 90% de Metano e os outros 10% de outros gases como Etano, já que é o segundo gás em maior abundância, e tem a formulação representada pela Equação (Eq.3.2).



O Biogás é constituído majoritariamente de Metano, Gás Carbônico e ínfimas quantidades de outros gases (Limas & Passamani, 2012), podendo ser considerado apenas como Metano e Gás Carbônico. A partir da Tabela 7 pode-se observar os 6

ciclos de teste realizados por Panjičko (2017) para produção de biogás através do bagaço de malte, encontrando uma média de 55% de Metano e 45% de Gás carbônico. Sendo essa a distribuição molar considerada para esse problema e representada na Equação (Eq.3.3) abaixo.

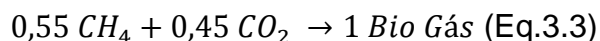


Tabela 7 - Porcentagem de Metano e Dióxido de Carbono no Biogás oriundo do Sub Produto Cervejeiro

Teste	Bagaço (kg)	Biogás (L)	CH4 (L)	CO2 (L)
Ciclo 1	1,5	137,9	85,4	52,5
Ciclo 2	1	103,2	58,4	44,8
Ciclo 3	1	93,2	41,3	51,9
Ciclo 4	1	107,1	48,5	58,6
Ciclo 5	1	102,3	54,8	47,5
Ciclo 6	1	90,4	58,3	32,1
Total	6,5	634,1	346,7	287,4
	%		0,55	0,45

Fonte: Panjičko (2017)

A partir dos volumes de metano e gás carbônico gerados, pode-se calcular quanto, em kg, é a massa gerada, multiplicando a relação de litros por quilos de bagaço pela sua densidade. A densidade pode ser calculada como:

$$D = \frac{MM \cdot P}{R \cdot T} \quad (3.4)$$

Sendo:

MM = 16 g pro metano e 44 g pro Gás Carbônico P = 1 atm

R = 0,082 atm l / K mol

T = 273 k

Realizando a soma dos produtos da relação l/kg com a densidade (Eq.3.4) de cada um dos respectivos gases obtêm-se uma geração de 0,13 kg de gás para cada 1 kg de bagaço de malte.

Definida a composição dos elementos, pode-se calcular as respectivas massas molares. A Tabela 8 fornece esses valores. É possível perceber que o Biogás possui uma massa maior que a do Gás Natural, isso se deve ao fato de 45 % de sua composição ser de Gás Carbônico, enquanto o Gás Natural é majoritariamente composto por 90% metano e 10% etano.

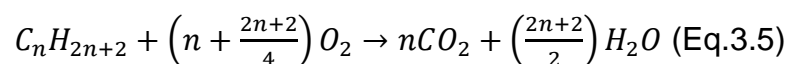
Tabela 8 - Massa molar dos gases envolvidos no processo de combustão

Substância	Peso molar (kg/mol)
Metano	16
Etano	30
Gás Natural	17,4
Biogás	28,6
Ar Seco	28,84

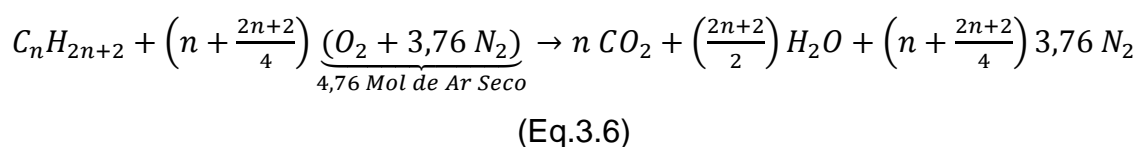
Fonte: Produção Própria (2019).

3.3.2 Equações de Combustão

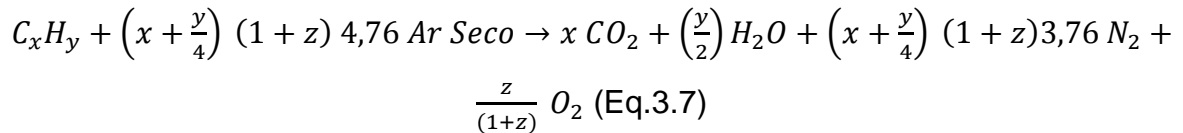
ÇENGEL (2013) define, através da equação (Eq.3.5), a reação geral para a combustão de qualquer composto hidrocarboneto contendo apenas Carbono e Hidrogênio como:



Como o oxigênio usado é o presente no próprio ar, pode-se reescrever a equação adicionando o Nitrogênio aos termos de produto e reagente, como demonstra a Equação Eq.3.6. O Nitrogênio participa da reação como um elemento inerte, isto é, não reage com os demais elementos. Apesar de isso não ser bem verdade na prática, para fins de cálculos pode-se considera-lo assim (Çengel, 2013).

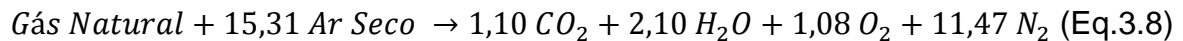


Substituindo os termos referentes ao Ar Seco e adicionando o excesso de Oxigênio, tem-se:

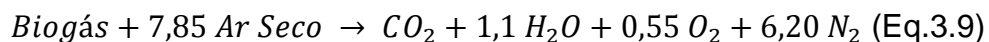


Sendo z o excesso de Oxigênio.

Substituindo os termos de (Eq.3.2) em (Eq.3.7) e utilizando z = 50% encontra-se a equação de combustão do Gás Natural para este problema:



Realizando o mesmo processo da equação (Eq.3.8) para o Biogás tem-se:



Através das massas molares de cada um dos elementos pode-se determinar a Relação Ar Combustível, isto é, a proporção em quilos de ar necessária para cada quilo de combustível, definida matematicamente como:

$$R_{ac} = \frac{N^{\circ}mol \times MM_{ar}}{N^{\circ}mol \times MM_{combustível}} \text{ (Eq.3.10)}$$

3.3.3 Poder Calorífico

Poder calorífico é a energia liberada na forma de calor por unidade de massa de uma substância através da combustão. Ele é dito superior (PCS) quando se considera a energia necessária para vaporizar a água oriunda do processo, enquanto é inferior (PCI) quando não se considera essa parcela. Por isso, o Poder Calorífico Superior nunca pode ser menor que o Poder Calorífico Inferior, no máximo igual, que é o que acontece quando o produto da combustão não resulta na produção de vapor

d'água (Oliveira, 2014). Por isso se considera o valor do Poder Calorífico Inferior como entalpia do combustível.

O Poder Calorífico do Biogás é em função direta da concentração de Metano como pode ser evidenciado na Tabela 9, sendo o menor valor de PCI igual a 465,43 kcal/kg para de 10% de metano e o maior igual a 11661,02 kcal/kg para 99%. O Valor utilizado nesse trabalho é de 15719,77 kJ/kg, encontrado através da interpolação entre os valores de 40% e 60%. Realizou-se a transformação de kcal para kJ, multiplicando o resultado encontrado por 4,184.

Tabela 9 - Poder calorífico do Biogás em função da concentração (%) de metano

Concentração de Metano (%)	Peso Específico (N/m ³)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)
10	1,8393	465,43
40	1,4643	2338,52
60	1,2143	4229,98
65	1,1518	4831,14
75	1,0268	6253,01
95	0,7768	10469,6
99	0,7268	11661,02

Fonte: Limas & Passamani (2012)

O manual de operação da Turbina utilizado pelos técnicos na Planta de Cogeração considera 53017,24 kJ/kg o Poder Calorífico Inferior do Gás Natural usado.

3.4 Usina de Cogeração

A Figura 17 mostra o diagrama estudado da Usina de Cogeração em funcionamento na Cervejaria adotada como caso de estudo, composta por turbina à gás funcionando em Ciclo Brayton com rendimento de 80%, gerando 3 MW de energia elétrica, integrada a um sistema de recuperação de calor que produz 10 ton/hora de vapor à 750 kPa de pressão e temperatura de 175,75°C a partir dos gases de exaustão obtidos no processo de combustão do gás natural e o ar atmosférico. O gás natural é injetado na câmara de combustão à 1675 kPa de pressão e 67°C de temperatura e o ar atmosférico é comprimido através de um compressor com, também, rendimento de 80% até o mesmo valor de pressão do combustível e adicionado para queima à

pressão constante considerando uma relação ar/combustível igual a 25,44, gerando gases de exaustão com temperatura igual 647°C.

A integração do sistema turbina a gás e caldeira de recuperação de calor é associado aos processos envase e fervura do mosto, os quais aproveitam o vapor produzido na caldeira de recuperação para a obtenção do produto final (cerveja). Um tanque de condensação produz condensado a 125 kPa de pressão e 105°C de temperatura, que é aproveitado no termo economizador onde a temperatura do condensado é aumentada até 133°C visando maior eficiência energética no funcionamento da caldeira de recuperação de calor. Uma bomba de 3 kW aumenta a pressão do condensado até 750 kPa antes de enviá-lo ao termo economizador.

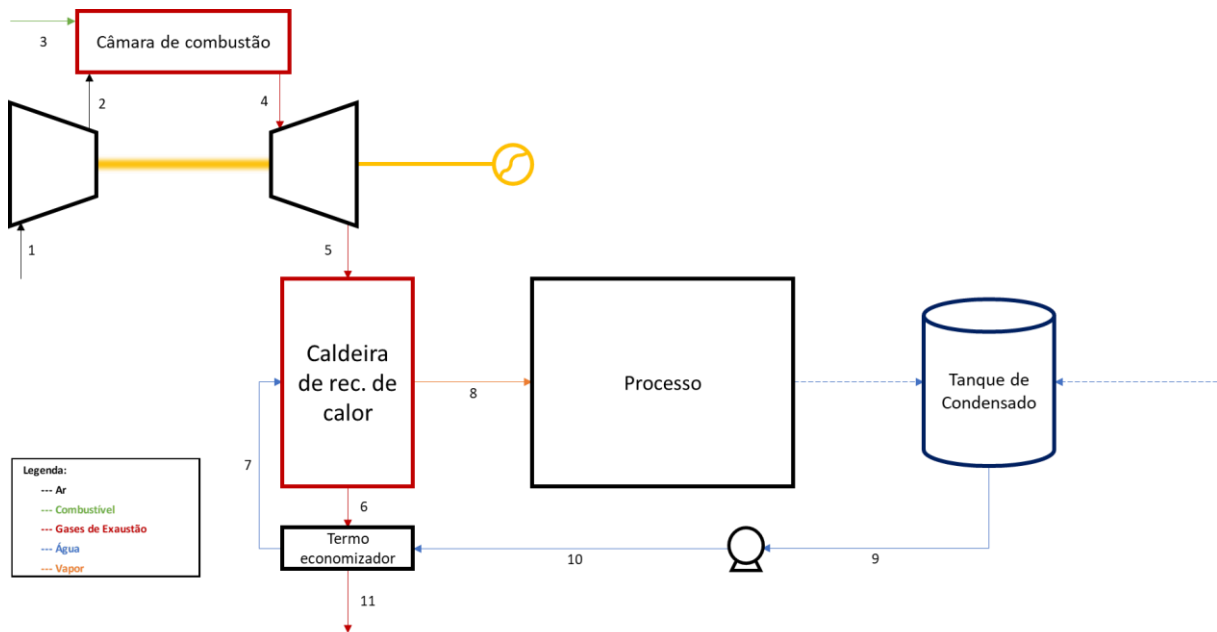


Figura 16: Visão Geral do Processo

Fonte: Produção Própria (2019).

A Tabela 10 indica como coletou-se os valores evidenciados na tabela 13. Os valores de temperatura e pressão foram recolhidos utilizando o software de operação da usina de cogeração através dos valores médios arquivados em sua memória. Como a única informação que se tinha do vapor era a sua pressão e titulação no manual de operação, foi usada a Tabela A-5 do Çengel (Anexo A) para determinar sua temperatura. Os valores de Entalpia do ar atmosférico e água foram determinados, respectivamente, pelas Tabela A-17 e A-5 do Çengel associados aos

valores de Temperatura e Pressão encontrados na memória do software de operação. O PCI e vazão mássica do Combustível (Gás Natural) foram encontrados através do manual de operação da usina de cogeração, já que essa informação não foi apresentada no Software utilizado para operar o sistema. Com os valores de vazão mássica do combustível calculou-se as vazões dos gases de combustão e ar atmosférico a partir das relações estequiométricas obtidas (Eq 3.8 e Eq 3.9). As entalpias do gás de combustão em cada uma das etapas foram determinadas através do balanço de massa e energia segundo a primeira lei da termodinâmica.

Tabela 10 - Modelagem da Tabela Dinâmica

Item	Produto	Vazão Massica (kg/s)	Temperatura (C°)	Pressão (kPa)	Entalpia / PCI (kJ/kg)	Titulação
1	Ar Atmosférico	Cálculo pelo Balanço Estequiométrico	Coletado pelo sistema de operação	Coletado pelo sistema de operação	Tabela A-17 Çengel	-
2	Ar Atmosférico	Cálculo pelo Balanço Estequiométrico	Coletado pelo sistema de operação	Coletado pelo sistema de operação	Tabela A-17 Çengel	-
3	Combustível	Manual de Operação	Coletado pelo sistema de operação	Coletado pelo sistema de operação	Manual de Operação	-
4	Gases de Exaustão	Balanço de Massa	Coletado pelo sistema de operação	Coletado pelo sistema de operação	Balanço de massa e energia	-
5	Gases de Exaustão	Balanço de Massa	Coletado pelo sistema de operação	Não coletado	Balanço de massa e energia	-
6	Gases de Exaustão	Balanço de Massa	Coletado pelo sistema de operação	Não coletado	Balanço de massa e energia	-
7	H2O	Manual de Operação	Coletado pelo sistema de operação	Coletado pelo sistema de operação	Tabela A-5 Çengel	-
8	H2O	Manual de Operação	Tabela A-5 Çengel	Coletado pelo sistema de operação	Tabela A-5 Çengel	Manual de Operação
9	H2O	Manual de Operação	Coletado pelo sistema de operação	Coletado pelo sistema de operação	Tabela A-5 Çengel	-

10	H2O	Manual de Operação	Coletado pelo sistema de operação	Pressão de Combustão	Tabela A-5 Çengel	-
11	Gases de Exaustão	Balanço de Massa	Coletado pelo sistema de operação	Coletado pelo sistema de operação	Balanço de massa e energia	-

Produção Própria (2019)

3.4.1 Balanços de Massa e Energia aplicado aos Volumes de Controle

Para realizar os cálculos de massa e energia considerou-se como volume cada um dos equipamentos, sendo eles o Compressor, Câmara de Combustão, Turbina, Caldeira de Recuperação de Calor, termoeconomizador e bomba, e a Eq 2.8.

3.4.1.1 Compressor

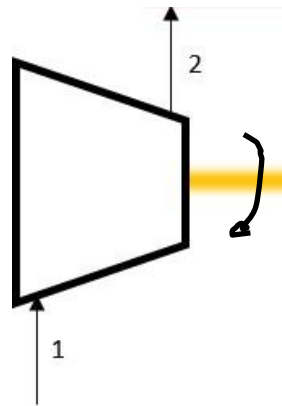


Figura 17: Representação do Compressor

Fonte: Produção Própria (2019).

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \text{ (Eq.3.11)}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{compressor} = \dot{m}_2 h_2 \text{ (Eq.3.12)}$$

3.4.1.2 Câmara de Combustão:

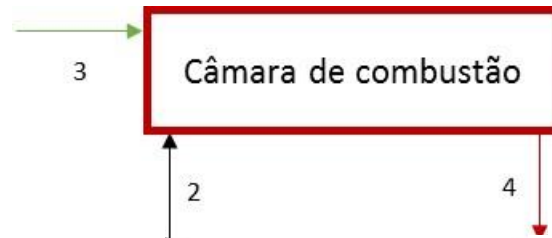


Figura 18: Representação da Câmara de Combustão

Fonte: Produção Própria (2019).

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \text{ (Eq.3.13)}$$

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 \text{ (Eq.3.14)}$$

Considerando a relação de massa ar combustível, podemos considerar o balanço de massa como:

$$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \text{ (Eq.3.15)}$$

3.4.1.3 Turbina:

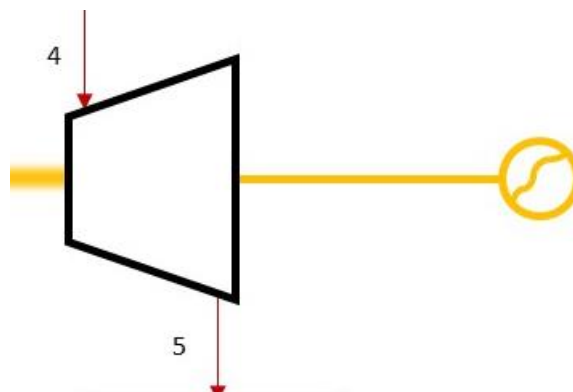


Figura 19: Representação da Turbina

Fonte: Produção Própria (2019).

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \text{ (Eq.3.16)}$$

$$\dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{Turbina} \text{ (Eq.3.17)}$$

3.4.1.4 Caldeira de Recuperação de Calor:

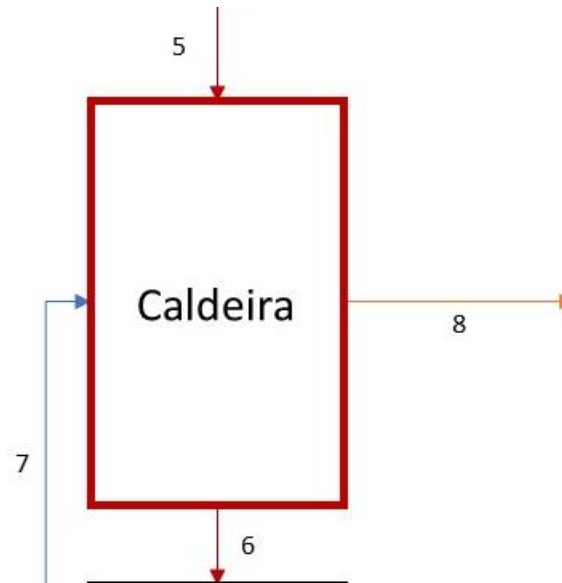


Figura 20: Representação da Caldeira

Fonte: Produção Própria (2019).

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_8 \text{ (Eq.3.18)}$$

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_8 h_8 \text{ (Eq.3.19)}$$

3.4.1.5 Termo Economizador:



Figura 21: Representação do termo economizador

Fonte: Produção Própria (2019).

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{11} \text{ (Eq.3.20)}$$

$$\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{11} h_{11} \text{ (Eq.3.21)}$$

3.4.1.6 Bomba:

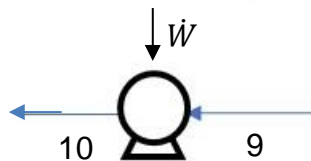


Figura 223: Representação da Bomba

Fonte: Produção Própria (2019).

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \text{ (Eq.3.22)}$$

$$\dot{m}_9 h_9 + \dot{W}_{Bomba} = \dot{m}_{10} h_{10} \text{ (Eq.3.23)}$$

A partir das equações 3.10, 3.12, 3.15, 3.17, 2.19, 3.21, 3.23 e dos dados coletados, pode-se preencher a Tabela 10 da forma mostrada na Tabela 11. Nela temos evidenciado que a vazão mássica de Ar Atmosférico é em função direta do valor de combustível usado e proporcional a relação de Ar Combustível, enquanto a vazão mássica dos Gases de Combustão é calculada pela soma dos valores do Ar Atmosférico e Combustível, através do balanço de massa na câmara de combustão (Eq 3.15). As entalpias que na Tabela 10 foram assinaladas como incógnita das equações de balanço de massa e energia têm suas formulações algébricas evidenciadas.

Tabela 11 – Modelagem da Tabela Dinâmica

Item	Produto	Vazão Massica (kg/s)	Temperatura (C°)	Pressão (kPa)	Entalpia / PCI (kJ/kg)	Titulação
1	Ar Atmosférico	$R_{ac} \dot{m}_3$	27	101,32	300,19	-
2	Ar Atmosférico	$R_{ac} \dot{m}_3$	387	1765	670,47	-
3	Combustível	\dot{m}_3	67	1765	53017,24	-

4	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	647	1765	$\frac{\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3}{\dot{m}_4}$	-
5	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	523	-	$\frac{\dot{m}_4 h_4 - \dot{W}_{Turbina}}{\dot{m}_5}$	-
6	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	253	-	$\frac{\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_8 h_8}{\dot{m}_6}$	-
7	H2O	2,78	133	750	556,93	-
8	H2O	2,78	167,75	750	2471,65	0,98
9	H2O	2,78	105	125	444,36	-
10	H2O	2,78	105	750	445,15	-
11	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	133	101,32	$\frac{\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_7 h_7}{\dot{m}_{11}}$	-

Produção Própria (2019)

3.4.2 Eficiência Térmica

A Eficiência Térmica pode ser definida como a razão entre o trabalho líquido produzido e o calor total fornecido ao sistema, ou seja:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{\text{líquido}}}{\dot{Q}_{\text{Total fornecida}}} \quad (\text{Eq.3.24})$$

A taxa de Trabalho líquido é o resultado do trabalho gerado vezes o rendimento próprio, podendo ser dito como a Taxa de Trabalho líquido fornecido pela turbina:

$$\dot{W}_{\text{Líquido}} = \eta_{\text{próprio}} \times \dot{W}_{\text{turbina}} \quad (\text{Eq.3.25})$$

Ou seja, a taxa de energia gerada pelo sistema vai ser sempre inferior ao total gerado, visto que não existe equipamento com 100% de eficiência. Quando o equipamento recebe energia do sistema, como são os casos das bombas e compressores, a equação de eficiência pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{W}_{\text{Consumido}} = \frac{\dot{W}_{\text{compressor}}}{\eta_{\text{próprio}}} \quad (\text{Eq.3.26})$$

O valor calculado nas equações termodinâmicas são os valores líquidos envolvidos no processo, por isso divide-se pelo rendimento, para encontrar o total que realmente é consumido.

Já o Calor gerado pode ser escrito como todo o calor gerado no sistema. No caso desse problema o calor é fornecido apenas pela queima de combustível na câmara de combustão, a partir daí todos os processos de aquecimento são realizados através da troca térmica. $\dot{Q}_{Total\ fornecida}$ pode ser escrito como o produto da massa por seu Poder Calorífico Inferior, isto é:

$$\dot{Q}_{Total\ fornecida} = \dot{m}_{combustível} \times PCI \text{ (Eq.3.27)}$$

A Tabela 12 mostra os valores de rendimento, trabalho e calor fornecido dos equipamentos durante a análise dos resultados. As potências do compressor e bomba são calculadas através dos balanços de massa e energia de cada componente, as Potências Consumidas utilizam esses valores encontrados e dividem pela sua eficiência, o calor gerado é produto da vazão mássica de combustível e seu PCI e a Eficiência térmica da turbina é a relação entre a energia elétrica entregue a rede e o Calor total gerado pela combustão do combustível.

Tabela 12 – Modelagem da Tabela de Potências e Eficiências Térmicas

Equipamento	Potência	Eficiência	Potência líquida	Equação para Potência Consumida	Calor Gerado	Equação para Eficiência Térmica
Turbina	3750	80%	3000	-	-	$\frac{\dot{W}_{líquido}}{\dot{Q}_{Total\ fornecida}}$
Compressor	$\dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_9h_9$	80%	-	$\frac{\dot{W}_{compressor}}{\eta_{próprio}}$	-	-
Bomba	$\dot{m}_2h_2 - \dot{m}_1h_1$	95%	-	$\frac{\dot{W}_{bomba}}{\eta_{próprio}}$	-	-
Câmara de Combustão	-	-	-	-	$\dot{Q}_{Total\ fornecida} = \dot{m}_{combustível} \times PCI$	-

Produção Própria (2019)

4 RESULTADOS

4.1 Gás Natural

A partir das equações pode-se chegar aos seguintes valores termodinâmicos conforme mostra a tabela 13.

Tabela 13 – Valores termodinâmicos da turbina operada com gás natural

Estado	Produto	Vazão Massica (kg/s)	Temperatura (C°)	Pressão (kPa)	Entalpia (kJ/kg)	Titulação
1	Ar Atmosférico	4,0711	27	101,32	300,19	-
2	Ar Atmosférico	4,0711	387	1765	670,47	-
3	Gás de Combustão	0,16	67	1765	53017,24	-
4	Gases de Exaustão	4,2311	647	1765	2649,99	-
5	Gases de Exaustão	4,2311	523	-	1763,69	-
6	Gases de Exaustão	4,2311	253	-	505,63	-
7	H2O	2,78	133	750	556,93	-
8	H2O	2,78	167,75	750	2471,65	0,98
9	H2O	2,78	105	125	444,36	-
10	H2O	2,78	105	750	445,15	-
11	Gases de Exaustão	4,2311	133	101,32	432,19	-

Fonte: Produção Própria (2019).

Nota-se que o maior valor de entalpia foi encontrado no processo de combustão, associado com os gases de exaustão, valor que diminui conforme há geração de trabalho e troca de calor na turbina a gás. A partir destes valores, pode-se calcular as potências geradas e consumidas, bem como as eficiências, em cada equipamento do ciclo brayton, conforme mostra a tabela 14.

Tabela 14 - Potência e Eficiência determinadas no Ciclo Brayton alimentado com gás natural

Equipamento	Potência	Eficiência	Potência Líquida	Potência Consumida	Calor Gerado	Eficiência Térmica
Turbina	3750	80%	3000	-	-	35%
Compressor	1763,69	80%	-	2204,61	-	-
Bomba	2,2	95%	-	2,32	-	0%
Câmara de Combustão	-	-	-	-	8482,76	-

Fonte: Produção Própria (2019).

Observa-se que a bomba consome uma parcela quase nula do total de calor gerado, sem ter influência nos fluxos de energia do sistema. ÇENGEL (2013) obteve

eficiência térmica de 36% em caso de estudo similar ao proposto no presente trabalho, valor bem próximo do encontrado a partir dos dados coletados. Também se percebe que 58% da energia fornecida pela turbina é usada nos compressores que fornecem o ar atmosférico para a câmara de combustão.

4.2 Biogás

A partir dos dados de produção média diária por cada dia do mês fornecido pela Tabela 6 e com o valor encontrado de 0,13 kg de Biogás por kg de Bagaço de malte pode-se estimar o potencial de biogás produzido a partir do aproveitamento energético do bagaço de malte, o mesmo pode ser obtido por dia, mês e ano, sendo esses valores representados graficamente através da figura 24. O mercado cervejeiro tem um comportamento sazonal, onde as demandas são maiores nos períodos festivos de fim e início de ano. Enquanto os seus maiores valores de venda são em novembro, dezembro e janeiro, os menores são vistos nos segundo e terceiro trimestres do ano. Como a taxa de geração de biogás acompanha a produção de cerveja conseguimos observar o mesmo comportamento numa série temporal para as taxas de geração de biogás.

A combustão dar-se-á a pressão constante e com combustível e comburente com a mesma pressão de entrada, da mesma forma que opera a câmara de combustão com a alimentação de biogás. A partir do balanço estequiométrico evidenciado na equação 3.9 e utilizando os valores de massa molar do Biogás e Ar Atmosférico encontrados na Tabela 8, a relação ar combustível do biogás para esse problema é de 7,92.

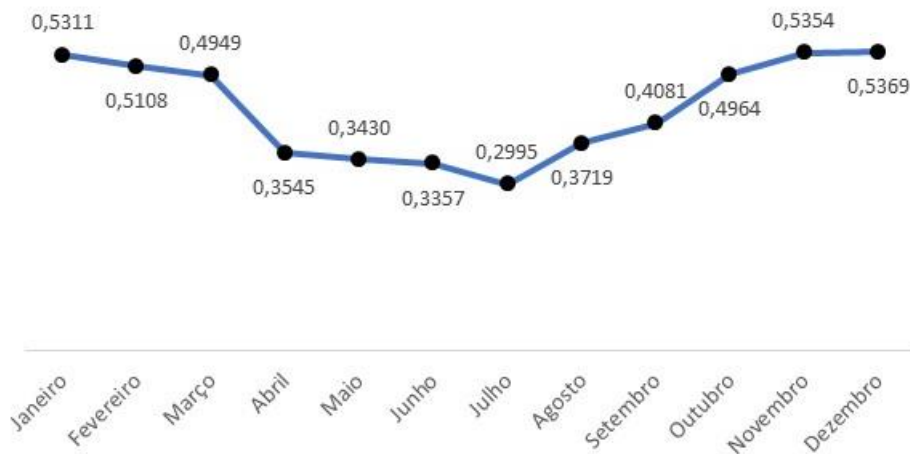


Figura 24: Potencial de Fornecimento de Biogás (Kg/s)

Fonte: Produção Própria (2019).

Para cada um desses valores tem-se uma quantidade de energia diferente, isto é, como a demanda de cerveja segue um comportamento sazonal há uma produção elevada nos primeiro e último trimestres do ano e valores mais moderados nos outros dois trimestres, com uma leve inclinação no mês de setembro indicando o início do período de alta demanda. Dessa forma determinou-se as entalpias necessárias pra cada uma dessas vazões mássicas de biogás, assumindo que a turbina tenha que gerar os mesmos 3 MW de energia líquida. O modelo utilizado foi o mesmo para o gás natural, isto é, assumiu-se as mesmas temperaturas, pressões e entalpia do Ar Atmosférico e Água, sendo incógnita apenas as entalpias dos Gases de Exaustão e as vazões mássicas dos Gases de Exaustão e Ar Atmosférico. Como a quantidade de Ar Atmosférico é em função da taxa de injeção de combustível nas câmaras de combustão, seu valor muda de acordo com os meses de trabalho, logo seu trabalho também é uma variável do estudo. A tabela 15 evidencia as entalpias que são incógnitas desse problema e deixa os valores de vazão em função da vazão mássica \dot{m}_3 do biogás, que é variável ao longo do mês

Tabela 15 – Valores termodinâmicos obtidos a partir do balanço energético realizado na turbina quando alimentada com biogás.

Item	Produto	Vazão Massica (kg/s)	Temperatura (C°)	Pressão (kPa)	Entalpia (kJ/kg)	Titulação
1	Ar Atmosférico	$R_{ac} \dot{m}_3$	27,00	101,32	300,19	-
2	Ar Atmosférico	$R_{ac} \dot{m}_3$	387,00	1765,00	670,47	-

3	Combustível	\dot{m}_3	67,00	1765,00	15719,77	-
4	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	647,00	1765,00	h4	-
5	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	523,00	-	h5	-
6	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	253,00	-	h6	-
7	H2O	2,78	133,00	750,00	556,93	-
8	H2O	2,78	167,75	750,00	2471,65	0,98
9	H2O	2,78	105,00	125,00	444,36	-
10	H2O	2,78	105,00	750,00	445,15	-
11	Gases de Exaustão	$R_{ac} \dot{m}_3 + \dot{m}_3$	133,00	101,32	h13	-

Fonte: Produção Própria (2019).

Realizando os cálculos das incógnitas consegue-se montar a tabela 16 com os seus valores para cada vazão mássica de biogás:

Tabela 16 – Incógnitas do sistema de alimentado por biogás

Mês	kg/s (Biogás)	$W_{compressor}$ (kJ)	h4 (kJ/kg)	h5 (kJ/kg)	h6 (kJ/kg)	h13 (kJ/kg)	$W_{Turbina}$ (kJ)
Janeiro	0,53	1556,65	2358,39	1566,43	442,28	376,65	11167,14
Fevereiro	0,51	1497,27	2358,39	1535,02	366,29	298,06	10741,14
Março	0,49	1450,61	2358,39	1508,54	302,21	231,79	10406,43
Abril	0,35	1039,18	2358,39	1172,06	-511,87	-610,17	7454,9
Maio	0,34	1005,25	2358,39	1132,02	-608,75	-710,38	7211,48
Junho	0,34	984,04	2358,39	1105,59	-672,7	-776,52	7059,34
Julho	0,3	878	2358,39	954,28	-1038,78	-1155,13	6298,63
Agosto	0,37	1090,08	2358,39	1227,46	-377,85	-471,56	7820,04
Setembro	0,41	1196,12	2358,39	1327,72	-135,27	-220,68	8580,74
Outubro	0,5	1454,85	2358,39	1511,01	308,21	237,99	10436,86
Novembro	0,54	1569,38	2358,39	1572,85	457,81	392,72	11258,42
Dezembro	0,54	1573,62	2358,39	1574,97	462,94	398,02	11288,85

Fonte: Produção Própria (2019).

A Tabela 16 evidencia o sustento do cálculo, visto que a entalpia de saída da câmara de combustão é diretamente proporcional às entalpias de entrada, que são fixas, e a relação de massa ar combustível, também fixo. Todavia, as entalpias nos estados 5 e 6 possuem valores negativos, algo inexistente na prática. Estes valores podem ser interpretados como uma taxa de geração de calor inferior a trabalhada nominalmente pela turbina, isto é, a entalpia gerada no processo de combustão não é

suficiente para gerar a potência de 3 MW. Sendo assim, pode-se concluir que para esses casos será necessário um complemento de alguma outra fonte de energia para compensar o déficit de entalpia. Dessa forma, através da equação de energia fornecida em forma de calor nos meses de abril até setembro e fixando o valor assumido em projeto tem-se que:

$$\dot{Q}_{biogás} < \dot{Q}_{gás\ natural} \text{ (Eq.4.1)}$$

Supondo que o combustível utilizado para compensar a diferença de calor \dot{Q}' gerado na câmara de combustão seja o Gás Natural, pode-se escrever :

$$\dot{Q}_{biogás} + m'_{gás\ natural} \times h_{gás\ natural} = \dot{Q}_{gás\ natural} \text{ (Eq.4.2)}$$

Fazendo a substituição de \dot{Q}' pela equação 3.27, tem-se:

$$\dot{Q}_{biogás} + m'_{gás\ natural} \times h_{gás\ natural} = \dot{Q}_{gás\ natural} \text{ (Eq.4.3)}$$

E colocando a massa necessária de gás natural em evidência tem-se:

$$m'_{gás\ natural} = \frac{(\dot{Q}_{gás\ natural} - \dot{Q}_{biogás})}{h_{gás\ natural}} \text{ (Eq.4.4)}$$

Apesar dos valores para os meses dos primeiro e último trimestres apresentarem entalpia positiva, realizou-se o cálculo para todos os meses, considerando os dados assumidos no projeto da planta de cogeração. Dessa forma, consegue-se gerar os dois gráficos representados pelas figuras 27 e 28.

- A vazão mássica de gás natural necessária para suprir a defasagem de energia térmica e o quantos por cento isso representa em economia de gás natural em cada mês.

- O novo trabalho do compressor, visto que tem que ser considerada a compressão dos gases necessários para a mistura de ar combustível do gás natural e qual a porcentagem de energia fornecida pela turbina é consumida no compressor.

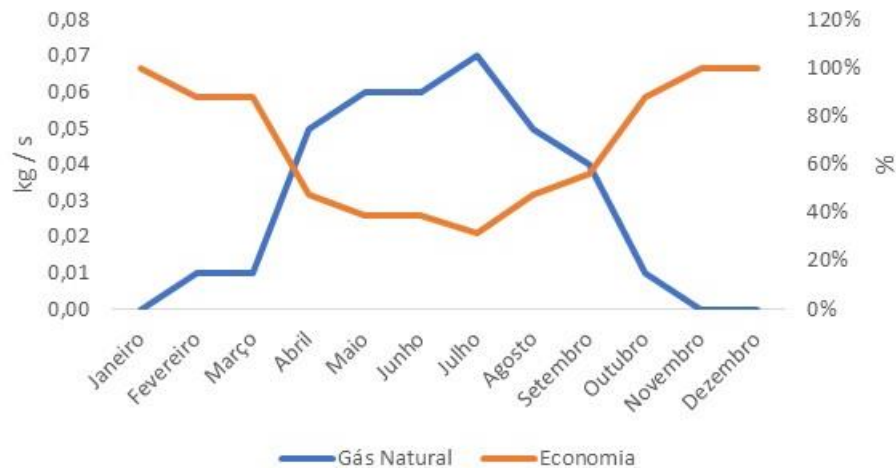


Figura 23: Vazão mássica de Gás Natural

Fonte: Produção Própria (2019).

A partir da figura 24 pode-se observar que se a usina de cogeração fosse alimentada pelo biogás gerado do seu próprio subproduto ela seria autossuficiente nos meses de janeiro, novembro e dezembro. Ou seja, uma maior demanda de cerveja permite que a sua produção seja mais limpa e gere economia de 100% da compra de gás natural. Além disso, nos meses de fevereiro, março e outubro, os quais as entalpias encontradas são todas positivas, para garantir a produção de calor de projeto e operação da Câmara de Operação, necessitaria de um complemento de injeção de Gás Natural. Como esse projeto visa utilizar os valores de operação dela, foi considerado que nesses três meses precisaria dessa injeção adicional de combustível. Nos meses onde os valores de entalpia são negativos percebemos um aumento agressivo na necessidade de uma segunda fonte de energia, sendo o seu maior valor no mês de julho e, conseqüentemente, o de menor economia de Gás Natural.

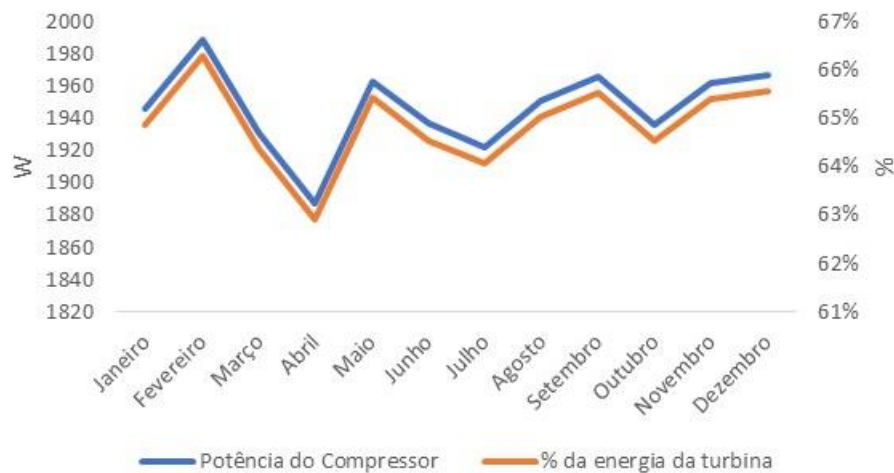


Figura 24: Potência no Compressor

Fonte: Produção Própria (2019).

A figura 25 relaciona as porcentagens de redução do gás natural com as porcentagens da energia da turbina consumida pelo compressor. Evidenciando que utilizando o biogás consegue-se ter mais energia disponibilizada na turbina para ser revendida ou usada nos processos de produção, tendo um ganho financeiro tanto em compra ou revenda de energia elétrica como na compra de Gás Natural.

O bagaço de malte é um subproduto com certo valor agregado, já que é vendido para produção de ração animal e geração de adubo. O produto sólido da biodigestão pode ser usado para este último fim, dessa forma cabe a empresa levar em consideração as receitas oriundas da venda do bagaço de malte com os números financeiros da economia de energia gerada e mais a possível venda do produto sólido como elemento fertilizante.

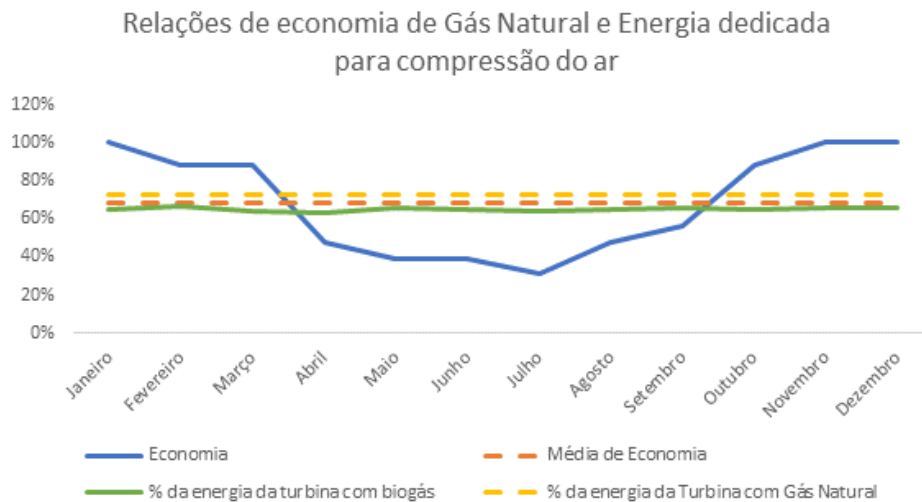


Figura 25: Relações de economia de Gás Natural e Energia dedicada para compressão do ar

Fonte: Produção Própria (2019).

A Figura 26 nos mostra o comportamento da economia na compra de Biogás, autossuficiência nos meses de Novembro, Dezembro e Janeiro, pouca necessidade de injeção adicional nos meses de Fevereiro, Março e Outubro e uma redução brusca na economia de Gás Natural nos demais 6 meses, sendo o mês de Julho o com menor valor, comparada as porcentagens de consumo da energia da turbina pelo compressor utilizando Biogás e Gás Natural, além da média de economia do consumo de Gás Natural ao longo do ano. A partir dessas informações pode-se dizer que o uso de biogás não só gera uma economia na compra de gás natural e um processo mais limpo como também aumenta a disponibilidade de energia elétrica gerado na Turbina para a rede da Cervejaria, visto que o compressor vai precisar menor esforço para comprimir o Ar Atmosférico.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivos a análise energética da usina de cogeração de uma cervejaria segundo a primeira lei da termodinâmica e comparar os resultados obtidos com os calculados, sob o mesmo princípio, seguindo a hipótese de alimentar a turbina com o biogás produzido a partir do subproduto cervejeiro, levando em conta o seu potencial energético recolhido na literatura.

Devido ao comportamento sazonal da indústria cervejeira, deve-se considerar a taxa de subproduto gerado por mês e, assim, entender a oferta de biogás natural em cada uma das 12 partes do ano. Durante o período de alta produção, contemplando os primeiro e último trimestres, observou-se valores próximos da autossuficiência, com todas as entalpias positivas, ou seja, sem uma ausência teórica dos valores de energia transportados pelos gases de exaustão. Entretanto, se comparados com a taxa nominal que a unidade de cogeração trabalha, apenas os meses de Janeiro, Novembro e Dezembro apresentam valores satisfatório, com uma economia de 100 % do Gás Natural.

Além disso, todos os resultados que utilizam só biogás ou a mistura dos dois combustíveis, apresentam um rendimento energético melhor, já que economiza-se 4% de energia no processo de compressão ao longo do ano, mostrando-se uma alternativa energética além de ambiental e econômica.

Dessa forma, podemos chegar à conclusão de que a solução a ser adotada para o caso estudado é do consumo híbrido de Gás Natural e biogás gerados, sendo autossuficiente apenas nos meses determinados acima, gerando uma economia de 66% no consumo de Gás Natural e redução de 4% no trabalho do compressor.

6 FUTUROS TRABALHOS

A partir dos aprendizados gerados ao longo do curso de engenharia, durante a pesquisa que culminou na escrita deste trabalho e experiências profissionais, seguem sugestões de futuros trabalhos para serem feitos a partir desse trabalho ou como continuação do mesmo:

- Realizar um estudo sobre as consequências da segunda lei da termodinâmica;
- Realizar um estudo técnico sobre a capacidade de ser autossuficiente nos meses em que há entalpia uma positiva mas o fornecimento de energia seja menor que o nominal;
- Dimensionar a ótima usina de geração de biogás para essa cervejaria;
- Estudar os impactos Termoeconômicos e ambientais;
- Analisar o Risco e Financeira do problema; Desenvolver Software para cálculo genérico desse tipo de problema para qualquer indústria.
- Realizar estudo do potencial de produção de biogás a partir dos resíduos do refeitório da Cervejaria Estudada

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, R.; SPERANZA, J. S.; PETITGAND, C. **Lixo zero: gestão de resíduos sólidos para uma sociedade mais próspera**. São Paulo: Planeta sustentável: Instituto Ethos, 2013.
- ALIYU, S., BALA, M. **Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications**. African Journal of Biotechnology: 10, 324-331, 2011.
- BARBIERI, J.C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. 3a Ed. São Paulo: Saraiva, 2011.
- BERGLUND, M.; BORJESSON, P. **Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production**. Biomass and Bioenergy, v. 30, p. 254–266, 2006.
- BERTOLINO, M. T.. **Sistemas de Gestão Ambiental na Indústria Alimentícia**. ArtMed, 2012.
- BRAUNGART, M., MCDONOUGH, W., BOLLINGER, A. **Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design**. Journal of Cleaner Production, 1-12, 2006.
- CAPPONI, S.; FAZIO, S.; BARBANTI, L. **CO2 savings affect the break-even distance of feedstock supply and digestate placement in biogas production**. Renewable , v.37, p. 45-52, 2012.
- CASSINI, S. T. **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: ABES/Rima, 210.p, 2003.
- CENBIO. **“Nota Técnica VII - Geração de Energia a Partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos e Rurais”**, São Paulo, 2001.
- ÇENGEL, Yunus A.; **TERMODINÂMICA**, 7ª ed., Porto Alegre, 2013
- CHANG, I-S.; ZHAO, J.; YIN, X.; WU, J.; JIA, Z.; WANG, L. **Comprehensive utilizations of biogas in Inner Mongolia, China**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 1442–1453, 2011.
- CONVERTI, A.; OLIVEIRA, R.P.S.; TORRES, B. R.; LODI, A.; ZILLI, M. **Biogas production and valorization by means of a two-step biological process**. BioresourceTechnology, v. 100, p. 5771–5776, 2009.
- DE LIMA, Danilo Angelus Pereira; WALTER, Fabio. **Produção Mais Limpa e Sustentabilidade na Indústria de Cerveja**. São Paulo: FEA-USP 2017.
- DIAS, Pâmela Castilho. **Análise de viabilidade da utilização do biogás gerado na digestão anaeróbia de levedura residual de cervejaria para geração de energia**. São Carlos: USP-São Carlos, 2014.

DOS SANTOS, B., FREDDO, L., CASSOL, F., **Avaliação do Tempo de Residência na Biodigestão de Resíduos da Indústria Cervejeira**. Cerro Largo: UFFS, 2017.

ELKINGTON, John. **Canibais com garfo e faca**. Ramalho, P. M. (trad.), São Paulo: Makron Books, 2001.

ENVIRONMENT CANADA; **Technical pollution prevention guide for brewery and winery operations in the Lower Frasier Basin**. Vancouver, 101p. 1997.

FERREIRA, I.M.L.L.V.O, PINHO, O., VIEIRA, E., TAVARELA, J.G. **Brewer's Saccharomyces yeast biomass: characteristics and potential applications**. Trends in Food Science & Technology 21: 77-84, 2010.

FERREIRA, G. S.. **Análise da estrutura de mercado da cerveja – a competitividade e estratégias de mercado da indústria cervejeira e microcervejarias**. Florianópolis: UFSC, 2016.

FILLAUDEAU, L., AVET, P.B., DAUFIN, G. **Water, wastewater and waste management in brewing industries**. Journal of Cleaner Production: 14, 463-471, 2006.

GALLEGO, Antonio Garrido. **Sistemas de Refrigeração a partir da Cogeração: Análise e simulação de propostas para o caso de cervejarias utilizando gás natural**. Santa Barbara d'Oeste: UNIMEP, 1998.

GASPAR, R.M.L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR** 2003. 215f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal De Santa Catarina, Porto Alegre, 2003.

HOUSE, H. **Alternative energy sources – biogas production**. In: London Swine Conference – Today's Challenges... Tomorrow's Opportunities. Anais. v. 3-4. Londres, 2007. Disponível em: <http://www.londonswineconference.ca/proceedings/2007/LSC2007_HHouse.pdf>. Acesso em: 20/08/2018.

IANNICELLI, André Luiz. **Reaproveitamento Energético do Biogás de Uma Indústria Cervejeira**. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2008.

IEA BIOENERGY. **Biogas Production and Utilisation**. [2003] Disponível em http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/56_Task37booklet.pdf Acesso em 17/09/2018.

JOHNSON, P., PALIWAL, J., CENKOWSKI, S. **Issues with utilisation of brewers' spent grain**. Stewart Postharvest Review: 4:2, 2010.

KAZMIERCZYK, P.. **Manual on the Development of Cleaner Production Policies. Approaches and Instruments**. UNIDO CP Programme, Vienna, oct. 2002.

KJAERHEIM, G.. **Cleaner production and sustainability**. Journal of Cleaner Production, v. 13, n. 4, p. 329-339, mar. 2005.

KLAGENBOECH, R., THOMAZINI, M.H., SILVA, G.M.C. **Resíduo Úmido de Cervejaria: Uma Alternativa na Alimentação Animal**. In.: Encontro de Divulgação Científica e Tecnológica. Toledo, 2011.

KUEHR, R. **Towards a sustainable society: United Nations University's Zero Emissions Approach**. Journal of Cleaner Production: 15, 1198-1204, 2007.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C.; **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO REATOR UASB DA ETE-UFES**. Vitória: UFES, 2012

LEGGETT, J.; GRAVES, R. E.; LANYON, L. E. **Anaerobic digestion: biogas production and odor reduction from manure**. s/d. Disponível em : <<http://www.docstoc.com/docs/28957272/Anaerobic-Digestion-Biogas-Production-and-Odor-Reduction-from-Manure>>. Acessado em: 13/10/2018.

LOPES, A. O. F. **Geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos orgânicos portuários**: 2015, 90p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MANNA, L.; ZANETTI, M.C.; GENON, G. **Modeling biogas production at landfill site**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 26, p. 1–14, 1999.

MONSORES, Maria Luiza da Silva Pires. **Mapeamento de Processo para Aumento de Eficiência Energética em Planta de Aproveitamento de Biogás**. Rio de Janeiro: UVA, 2017.

MUHA, I.; GRILLO, A.; HEISIG, M.; SCHÖNBERG, M.; LINKE, B.; WITTUM, G. **Mathematical modeling of process liquid flow and acetoclastic methanogenesis under mesophilic conditions in a two-phase biogas reactor**. *Bioresource Technology*, v. 106, p.1–9, 2012.

MUSSATO, S.I., DRAGONE, G., TEIXEIRA, J.A., ROBERTO, I.C. **Total reuse of brewer's spent grain and biotechnological processes for the production of added-value compounds**. *Bioenergy: challenges and opportunities*, 2008.

NIERO M., NEGRELLI, A.J., HOFFMEYER, S.B., OLSEN, S.I., BIRKVED, M. **Closing the loop for aluminum cans: Life Cycle Assesment of progression in Cradle-to-Cradle certification levels**. *Journal of Cleaner Production*: 126, 352-362, 2016.

NEWCORN, D. **Cradle-to-cradle: the next packaging paradigm?** Disponível em: <<http://www.packworld.com/cradle-cradle-next-packaging-paradigm-sidebar>> Acesso em 13/02/2019.

OLAJIRE, A.A., **The brewing industry and the environmental challenges**, *Journal of Cleaner Production* (2012), doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003

OTTO, K.N., WOOD, K.L. **Product design: techniques in reverse engineering and new product development**. Prentice Hall, 2001.

OLIVEIRA, L. R. et al. **Sustentabilidade: da evolução à estratégia nas organizações**. Produção, v. 22, n. 1, jan./fev. 2012.

OLIVEIRA, Matias Marchesan. **Estudo da Inclusão de Compartimentos em Biodigestores Modelo Canadense**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

Panjicko, M., Zupancic, G. D., Faneli, L., Logar, R. M., Tisma, M., Zelic, B. (2017). **Biogas production brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors**, Journal of Cleaner Production, 166, pp. 519-529

PAULI, G. **Emissão Zero**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1996.

PAULI, G. **Zero emissions: the ultimate goal of cleaner production**. Journal of Cleaner Production: 5, 109-113, 1997.

PAULI, G. **Clustering Beer, Energy and Food**, 2015. Acesso em 13/07/2018. Disponível em: <http://www.theblueeconomy.org/uploads/7/1/4/9/71490689/case_109_clustering_beer_energy_and_food_final_4_2015.pdf>

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP**. 2006, 153 p. Dissertação (Mestrado em Energia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, Ielton de Oliveira. **Tendências do Gás Natural: Análise de Eficiência em Ciclos Combinados-Estudo de Caso**. Itajubá: UNIFEI, 2018.

PIMENTA, H. C. D.; GOUVINHAS, R. P. **Cleaner Production as a Corporate Sustainability Tool: An Exploratory Discussion**. In III International Workshop Advances in Cleaner Production: CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD. São Paulo – Brazil – 18 – 20 May de 2011.

RAHIN, R., RAMAN, A.A.A **Cleaner production implementation in a fruit juice production plant**. Journal of Cleaner Production 101: 215-221, 2015.

RIVERA, A., GONZÁLEZ, J.S., CARRILLO, R., MARTÍNEZ, J.M. **Operational change as a profitable cleaner production tool for a brewery**. Journal of Cleaner Production 17 (2009), 137-142.

ROBERTSON, J. A., I'ANSON, K. J., TREIMO, J., FAULDS, C. B., BROCKLEHURST, T. F., EIJSINK, V. G., WALDRON, K. W. **Profiling brewers' spent grain for composition and microbial ecology at the site of production**. LWT-Food Science and Technology: 43(6), 890-896, 2010.

ROSA, M., BELOBORODKO, A. **A decision support method for development of industrial synergies: case studies of Latvian brewery and wood-processing industries.** Journal of Cleaner Production: 105, 461-470, 2015.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** 2007. 247f. Itajubá: UNIFEI, 2007.

SANTOS, M., JIMENEZ, J.J., BARTOLOME, B., GOMEZ-CORDOVES, C., DEL NOZAL, M.J. **Variability of brewers' spent grain within a brewery.** Food Chemical: 80, 17-21, 2003.

SANTOS, M.S., RIBEIRO, F.M. **Cervejas e Refrigerantes.** São Paulo: CETESB, 2005.

SASSE, L. **Biogas Plants.** in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) 1988. Disponível em <http://biogas.ifas.ufl.edu/ad_development/documents/biogasplants.pdf> Acessado em: 14/09/2018.

SEVERO, E.A., GUIMARÃES, J.C.F., DORION, E.C.H., NODARI, C.H. **Cleaner production, environmental sustainability and organizational performance: an empirical study in the Brazilian Metal-Mechanic industry.** Journal do Cleaner Production: 96, 118-125, 2015.

SILVA, A. C. C.; LEITÃO, M. P.; LEMOS, P. I. **Embalagem e informação: A importância da informação ambiental nos debates para gestão sustentável de resíduos no Brasil.** In: SANTOS, M. C. L. Design, Resíduo & Dignidade. São Paulo: Olhares, 2014. p. 185-201.

SILVA FILHO, C.R. e Soler, F.D. (2012). **Gestão de resíduos sólidos. O que diz a lei.** São Paulo: Trevisan Editora.

SOLDERA, B. C.; OLIVEIRA, E.. **Água sustentável (as): definição de um novo indicador ambiental.** In: IX Encontro de Geociência e Meio Ambiente. 2016, São Paulo. Anais... São Paulo: UNESP, 2016.

TOWNSLEY, P.M. **Preparation of commercial products from brewer's waste grain.** MBAA Technical Quarterly, 16: 130-134, 1979.

UMA GRANDE CERVEJARIA LOCALIZADA NA ZONA OESTE DO RIO DE JANEIRO. **Relatório Anual de Sustentabilidade,** 2017.

VALENTE JÚNIOR, A. S.; ALVES, F. C. D.. **Bebidas alcoólicas: Cerveja.** Caderno Setorial - Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, ETENE. n.2. out. 2016.

VALLE, C. E. **Qualidade ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente.** São Paulo: Pioneira, 1995.

VAN BERKEL, R.. **Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia.** Journal of Cleaner Production, 2007.

VIEIRA, A.A., BRAZ, J.M. **Bagaço de Cevada na Alimentação Animal**. Revista Eletrônica Nutritime: 6, 973-979, 2009.

VIEIRA, Pedro Rafael Lima. **Influência de Parâmetros Operacionais Sobre a Eficiência do Ciclo Brayton em Trubinas a Gás Estacionárias**. Natal: UFRN, 2016.

Villela, I. A. C.; **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO TERMoeCONômICO QUE CONSIDERA OS IMPACTOS AMBIENTAIS**, Guaratiguetá: UNESP, 2007

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - WBCSD. **Eco- efficient leadership for improved economic and environmental performance**, Jan.1996. Disponível em: www.wbcsd.org; Acesso em 19/08/2018.

YANG, S. T.; GUO, M.; **Kinetics of methanogenesis from whey permeate in packed bed immobilized cells bioreactor**. Biotechnology Bioengineering, 36:427. 1990.

ZWIA - ZERO WASTE INTERNATIONAL ALLIANCE. Acesso em 19/08/2018. Disponível em <http://zwia.org/standards/zw-deinition/>.

ANEXO A – Tabelas A5 e A17 Çengel

916		Termodinâmica										
TABELA A-5												
Água, líquido-vapor saturados – Tabela com entrada de pressão												
Press., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Volume específico, m ³ /kg		Energia interna, kJ/kg			Entalpia, kJ/kg			Entropia, kJ/kg·K		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat. u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat. u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1,0	6,97	0,001000	129,19	29,302	2.355,2	2.384,5	29,303	2.484,4	2.513,7	0,1059	8,8690	8,9749
1,5	13,02	0,001001	87,964	54,686	2.338,1	2.392,8	54,688	2.470,1	2.524,7	0,1956	8,6314	8,8270
2,0	17,50	0,001001	66,990	73,431	2.325,5	2.398,9	73,433	2.459,5	2.532,9	0,2606	8,4621	8,7227
2,5	21,08	0,001002	54,242	88,422	2.315,4	2.403,8	88,424	2.451,0	2.539,4	0,3118	8,3302	8,6421
3,0	24,08	0,001003	45,654	100,98	2.306,9	2.407,9	100,98	2.443,9	2.544,8	0,3543	8,2222	8,5765
4,0	28,96	0,001004	34,791	121,39	2.293,1	2.414,5	121,39	2.432,3	2.553,7	0,4224	8,0510	8,4734
5,0	32,87	0,001005	28,185	137,75	2.282,1	2.419,8	137,75	2.423,0	2.560,7	0,4762	7,9176	8,3938
7,5	40,29	0,001008	19,233	168,74	2.261,1	2.429,8	168,75	2.405,3	2.574,0	0,5763	7,6738	8,2501
10	45,81	0,001010	14,670	191,79	2.245,4	2.437,2	191,81	2.392,1	2.583,9	0,6492	7,4996	8,1488
15	53,97	0,001014	10,020	225,93	2.222,1	2.448,0	225,94	2.372,3	2.598,3	0,7549	7,2522	8,0071
20	60,06	0,001017	7,6481	251,40	2.204,6	2.456,0	251,42	2.357,5	2.608,9	0,8320	7,0752	7,9073
25	64,96	0,001020	6,2034	271,93	2.190,4	2.462,4	271,96	2.345,5	2.617,5	0,8932	6,9370	7,8302
30	69,09	0,001022	5,2287	289,24	2.178,5	2.467,7	289,27	2.335,3	2.624,6	0,9441	6,8234	7,7675
40	75,86	0,001026	3,9933	317,58	2.158,8	2.476,3	317,62	2.318,4	2.636,1	1,0261	6,6430	7,6691
50	81,32	0,001030	3,2403	340,49	2.142,7	2.483,2	340,54	2.304,7	2.645,2	1,0912	6,5019	7,5931
75	91,76	0,001037	2,2172	384,36	2.111,8	2.496,1	384,44	2.278,0	2.662,4	1,2132	6,2426	7,4558
100	99,61	0,001043	1,6941	417,40	2.088,2	2.505,6	417,51	2.257,5	2.675,0	1,3028	6,0562	7,3589
101,325	99,97	0,001043	1,6734	418,95	2.087,0	2.506,0	419,06	2.256,5	2.675,6	1,3069	6,0476	7,3545
125	105,97	0,001048	1,3750	444,23	2.068,8	2.513,0	444,36	2.240,6	2.684,9	1,3741	5,9100	7,2841
150	111,35	0,001053	1,1594	466,97	2.052,3	2.519,2	467,13	2.226,0	2.693,1	1,4337	5,7894	7,2231
175	116,04	0,001057	1,0037	486,82	2.037,7	2.524,5	487,01	2.213,1	2.700,2	1,4850	5,6865	7,1716
200	120,21	0,001061	0,88578	504,50	2.024,6	2.529,1	504,71	2.201,6	2.706,3	1,5302	5,5968	7,1270
225	123,97	0,001064	0,79329	520,47	2.012,7	2.533,2	520,71	2.191,0	2.711,7	1,5706	5,5171	7,0877
250	127,41	0,001067	0,71873	535,08	2.001,8	2.536,8	535,35	2.181,2	2.716,5	1,6072	5,4453	7,0525
275	130,58	0,001070	0,65732	548,57	1.991,6	2.540,1	548,86	2.172,0	2.720,9	1,6408	5,3800	7,0207
300	133,52	0,001073	0,60582	561,11	1.982,1	2.543,2	561,43	2.163,5	2.724,9	1,6717	5,3200	6,9917
325	136,27	0,001076	0,56199	572,84	1.973,1	2.545,9	573,19	2.155,4	2.728,6	1,7005	5,2645	6,9650
350	138,86	0,001079	0,52422	583,89	1.964,6	2.548,5	584,26	2.147,7	2.732,0	1,7274	5,2128	6,9402
375	141,30	0,001081	0,49133	594,32	1.956,6	2.550,9	594,73	2.140,4	2.735,1	1,7526	5,1645	6,9171
400	143,61	0,001084	0,46242	604,22	1.948,9	2.553,1	604,66	2.133,4	2.738,1	1,7765	5,1191	6,8955
450	147,90	0,001088	0,41392	622,65	1.934,5	2.557,1	623,14	2.120,3	2.743,4	1,8205	5,0356	6,8561
500	151,83	0,001093	0,37483	639,54	1.921,2	2.560,7	640,09	2.108,0	2.748,1	1,8604	4,9603	6,8207
550	155,46	0,001097	0,34261	655,16	1.908,8	2.563,9	655,77	2.096,6	2.752,4	1,8970	4,8916	6,7886
600	158,83	0,001101	0,31560	669,72	1.897,1	2.566,8	670,38	2.085,8	2.756,2	1,9308	4,8285	6,7593
650	161,98	0,001104	0,29260	683,37	1.886,1	2.569,4	684,08	2.075,5	2.759,6	1,9623	4,7699	6,7322
700	164,95	0,001108	0,27278	696,23	1.875,6	2.571,8	697,00	2.065,8	2.762,8	1,9918	4,7153	6,7071
750	167,75	0,001111	0,25552	708,40	1.865,6	2.574,0	709,24	2.056,4	2.765,7	2,0195	4,6642	6,6837

TABELA A-5

Água, líquido-vapor saturados – Tabela com entrada de pressão (conclusão)

Press., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volume específico, m ³ /kg		Energia interna, kJ/kg			Entalpia, kJ/kg			Entropia, kJ/kg·K		
		Líqu. sat., v _l	Vapor sat., v _v	Líqu. sat. u _l	Evap., u _{lv}	Vapor sat., u _v	Líqu. sat., h _l	Evap., h _{lv}	Vapor sat., h _v	Líqu. sat., s _l	Evap., s _{lv}	Vapor sat., s _v
800	170,41	0,001115	0,24035	719,97	1.856,1	2.576,0	720,87	2.047,5	2.768,3	2,0457	4,6160	6,6616
850	172,94	0,001118	0,22690	731,00	1.846,9	2.577,9	731,95	2.038,8	2.770,8	2,0705	4,5705	6,6409
900	175,35	0,001121	0,21489	741,55	1.838,1	2.579,6	742,56	2.030,5	2.773,0	2,0941	4,5273	6,6213
950	177,66	0,001124	0,20411	751,67	1.829,6	2.581,3	752,74	2.022,4	2.775,2	2,1166	4,4862	6,6027
1.000	179,88	0,001127	0,19436	761,39	1.821,4	2.582,8	762,51	2.014,6	2.777,1	2,1381	4,4470	6,5850
1.100	184,06	0,001133	0,17745	779,78	1.805,7	2.585,5	781,03	1.999,6	2.780,7	2,1785	4,3735	6,5520
1.200	187,96	0,001138	0,16326	796,96	1.790,9	2.587,8	798,33	1.985,4	2.783,8	2,2159	4,3058	6,5217
1.300	191,60	0,001144	0,15119	813,10	1.776,8	2.589,9	814,59	1.971,9	2.786,5	2,2508	4,2428	6,4936
1.400	195,04	0,001149	0,14078	828,35	1.763,4	2.591,8	829,96	1.958,9	2.788,9	2,2835	4,1840	6,4675
1.500	198,29	0,001154	0,13171	842,82	1.750,6	2.593,4	844,55	1.946,4	2.791,0	2,3143	4,1287	6,4430
1.750	205,72	0,001166	0,11344	876,12	1.720,6	2.596,7	878,16	1.917,1	2.795,2	2,3844	4,0033	6,3877
2.000	212,38	0,001177	0,099587	906,12	1.693,0	2.599,1	908,47	1.889,8	2.798,3	2,4467	3,8923	6,3390
2.250	218,41	0,001187	0,088717	933,54	1.667,3	2.600,9	936,21	1.864,3	2.800,5	2,5029	3,7926	6,2954
2.500	223,95	0,001197	0,079952	958,87	1.643,2	2.602,1	961,87	1.840,1	2.801,9	2,5542	3,7016	6,2558
3.000	233,85	0,001217	0,066667	1.004,6	1.598,5	2.603,2	1.008,3	1.794,9	2.803,2	2,6454	3,5402	6,1856
3.500	242,56	0,001235	0,057061	1.045,4	1.557,6	2.603,0	1.049,7	1.753,0	2.802,7	2,7253	3,3991	6,1244
4.000	250,35	0,001252	0,049779	1.082,4	1.519,3	2.601,7	1.087,4	1.713,5	2.800,8	2,7966	3,2731	6,0696
5.000	263,94	0,001286	0,039448	1.148,1	1.448,9	2.597,0	1.154,5	1.639,7	2.794,2	2,9207	3,0530	5,9737
6.000	275,59	0,001319	0,032449	1.205,8	1.384,1	2.589,9	1.213,8	1.570,9	2.784,6	3,0275	2,8627	5,8902
7.000	285,83	0,001352	0,027378	1.258,0	1.323,0	2.581,0	1.267,5	1.505,2	2.772,6	3,1220	2,6927	5,8148
8.000	295,01	0,001384	0,023525	1.306,0	1.264,5	2.570,5	1.317,1	1.441,6	2.758,7	3,2077	2,5373	5,7450
9.000	303,35	0,001418	0,020489	1.350,9	1.207,6	2.558,5	1.363,7	1.379,3	2.742,9	3,2866	2,3925	5,6791
10.000	311,00	0,001452	0,018028	1.393,3	1.151,8	2.545,2	1.407,8	1.317,6	2.725,5	3,3603	2,2556	5,6159
11.000	318,08	0,001488	0,015988	1.433,9	1.096,6	2.530,4	1.450,2	1.256,1	2.706,3	3,4299	2,1245	5,5544
12.000	324,68	0,001526	0,014264	1.473,0	1.041,3	2.514,3	1.491,3	1.194,1	2.685,4	3,4964	1,9975	5,4939
13.000	330,85	0,001566	0,012781	1.511,0	985,5	2.496,6	1.531,4	1.131,3	2.662,7	3,5606	1,8730	5,4336
14.000	336,67	0,001610	0,011487	1.548,4	928,7	2.477,1	1.571,0	1.067,0	2.637,9	3,6232	1,7497	5,3728
15.000	342,16	0,001657	0,010341	1.585,5	870,3	2.455,7	1.610,3	1.000,5	2.610,8	3,6848	1,6261	5,3108
16.000	347,36	0,001710	0,009312	1.622,6	809,4	2.432,0	1.649,9	931,1	2.581,0	3,7461	1,5005	5,2466
17.000	352,29	0,001770	0,008374	1.660,2	745,1	2.405,4	1.690,3	857,4	2.547,7	3,8082	1,3709	5,1791
18.000	356,99	0,001840	0,007504	1.699,1	675,9	2.375,0	1.732,2	777,8	2.510,0	3,8720	1,2343	5,1064
19.000	361,47	0,001926	0,006677	1.740,3	598,9	2.339,2	1.776,8	689,2	2.466,0	3,9396	1,0860	5,0256
20.000	365,75	0,002038	0,005862	1.785,8	509,0	2.294,8	1.826,6	585,5	2.412,1	4,0146	0,9164	4,9310
21.000	369,83	0,002207	0,004994	1.841,6	391,9	2.233,5	1.888,0	450,4	2.338,4	4,1071	0,7005	4,8076
22.000	373,71	0,002703	0,003644	1.951,7	140,8	2.092,4	2.011,1	161,5	2.172,6	4,2942	0,2496	4,5439
22.064	373,95	0,003106	0,003106	2.015,7	0	2.015,7	2.084,3	0	2.084,3	4,4070	0	4,4070

TABELA A-17

Propriedades de gás ideal do ar

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg-K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg-K
200	199,97	0,3363	142,56	1.707,0	1,29559	580	586,04	14,38	419,55	115,7	2,37348
210	209,97	0,3987	149,69	1.512,0	1,34444	590	596,52	15,31	427,15	110,6	2,39140
220	219,97	0,4690	156,82	1.346,0	1,39105	600	607,02	16,28	434,78	105,8	2,40902
230	230,02	0,5477	164,00	1.205,0	1,43557	610	617,53	17,30	442,42	101,2	2,42644
240	240,02	0,6355	171,13	1.084,0	1,47824	620	628,07	18,36	450,09	96,92	2,44356
250	250,05	0,7329	178,28	979,0	1,51917	630	638,63	19,84	457,78	92,84	2,46048
260	260,09	0,8405	185,45	887,8	1,55848	640	649,22	20,64	465,50	88,99	2,47716
270	270,11	0,9590	192,60	808,0	1,59634	650	659,84	21,86	473,25	85,34	2,49364
280	280,13	1,0889	199,75	738,0	1,63279	660	670,47	23,13	481,01	81,89	2,50985
285	285,14	1,1584	203,33	706,1	1,65055	670	681,14	24,46	488,81	78,61	2,52589
290	290,16	1,2311	206,91	676,1	1,66802	680	691,82	25,85	496,62	75,50	2,54175
295	295,17	1,3068	210,49	647,9	1,68515	690	702,52	27,29	504,45	72,56	2,55731
298	298,18	1,3543	212,64	631,9	1,69528	700	713,27	28,80	512,33	69,76	2,57277
300	300,19	1,3860	214,07	621,2	1,70203	710	724,04	30,38	520,23	67,07	2,58810
305	305,22	1,4686	217,67	596,0	1,71865	720	734,82	32,02	528,14	64,53	2,60319
310	310,24	1,5546	221,25	572,3	1,73498	730	745,62	33,72	536,07	62,13	2,61803
315	315,27	1,6442	224,85	549,8	1,75106	740	756,44	35,50	544,02	59,82	2,63280
320	320,29	1,7375	228,42	528,6	1,76690	750	767,29	37,35	551,99	57,63	2,64737
325	325,31	1,8345	232,02	508,4	1,78249	760	778,18	39,27	560,01	55,54	2,66176
330	330,34	1,9352	235,61	489,4	1,79783	780	800,03	43,35	576,12	51,64	2,69013
340	340,42	2,149	242,82	454,1	1,82790	800	821,95	47,75	592,30	48,08	2,71787
350	350,49	2,379	250,02	422,2	1,85708	820	843,98	52,59	608,59	44,84	2,74504
360	360,58	2,626	257,24	393,4	1,88543	840	866,08	57,60	624,95	41,85	2,77170
370	370,67	2,892	264,46	367,2	1,91313	860	888,27	63,09	641,40	39,12	2,79783
380	380,77	3,176	271,69	343,4	1,94001	880	910,56	68,98	657,95	36,61	2,82344
390	390,88	3,481	278,93	321,5	1,96633	900	932,93	75,29	674,58	34,31	2,84856
400	400,98	3,806	286,16	301,6	1,99194	920	955,38	82,05	691,28	32,18	2,87324
410	411,12	4,153	293,43	283,3	2,01699	940	977,92	89,28	708,08	30,22	2,89748
420	421,26	4,522	300,69	266,6	2,04142	960	1.000,55	97,00	725,02	28,40	2,92128
430	431,43	4,915	307,99	251,1	2,06533	980	1.023,25	105,2	741,98	26,73	2,94468
440	441,61	5,332	315,30	236,8	2,08870	1.000	1.046,04	114,0	758,94	25,17	2,96770
450	451,80	5,775	322,62	223,6	2,11161	1.020	1.068,89	123,4	776,10	23,72	2,99034
460	462,02	6,245	329,97	211,4	2,13407	1.040	1.091,85	133,3	793,36	23,29	3,01260
470	472,24	6,742	337,32	200,1	2,15604	1.060	1.114,86	143,9	810,62	21,14	3,03449
480	482,49	7,268	344,70	189,5	2,17760	1.080	1.137,89	155,2	827,88	19,98	3,05608
490	492,74	7,824	352,08	179,7	2,19876	1.100	1.161,07	167,1	845,33	18,896	3,07732
500	503,02	8,411	359,49	170,6	2,21952	1.120	1.184,28	179,7	862,79	17,886	3,09825
510	513,32	9,031	366,92	162,1	2,23993	1.140	1.207,57	193,1	880,35	16,946	3,11883
520	523,63	9,684	374,36	154,1	2,25997	1.160	1.230,92	207,2	897,91	16,064	3,13916
530	533,98	10,37	381,84	146,7	2,27967	1.180	1.254,34	222,2	915,57	15,241	3,15916
540	544,35	11,10	389,34	139,7	2,29906	1.200	1.277,79	238,0	933,33	14,470	3,17888
550	555,74	11,86	396,86	133,1	2,31809	1.220	1.301,31	254,7	951,09	13,747	3,19834
560	565,17	12,66	404,42	127,0	2,33685	1.240	1.324,93	272,3	968,95	13,069	3,21751
570	575,59	13,50	411,97	121,2	2,35531						