

PAULO HENRIQUE GOMES ARAUJO

**Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar para seu uso como
combustível em reatores de gaseificação**

Paulo Henrique Gomes Araujo

**Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar para seu uso como
combustível em reatores de gaseificação**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Conselho de Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Dr. Daniel Travieso Pedroso
Co-Orientador: Prof. Dr. João Andrade de
Carvalho Junior

Guaratinguetá-SP
2018

Araújo, Paulo Henrique Gomes
A663t Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar para seu uso como
combustível em reatores de gaseificação / Paulo Henrique Gomes Araujo –
Guaratinguetá, 2018.
100 f : il.
Bibliografia: f. 95-99

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Travieso Pedroso
Co-orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

1. Bagaço de cana. 2. Gaseificação de biomassa. 3. Energia – fontes
alternativas I. Título

CDU 620.91


Luciana Máximo
Bibliotecária-CRB-8/3595

PAULO HENRIQUE GOMES ARAUJO

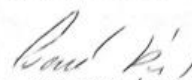
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

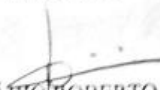
Prof. Dr. MARCELO CAMPAIO MARTINS


Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Dr. DANIEL TRAVIESO PEDROSO
Orientador/UNESP-FEG


Prof.ª, Dr.ª, IVONETE ÁVILA
UNESP/FEG


Eng. FÁBIO ROBERTO VIEIRA
UNESP/FEG

Junho de 2018

DADOS CURRICULARES

PAULO HENRIQUE GOMES ARAUJO

NASCIMENTO 09.01.1992 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO Ranieri Sousa de Araujo
Alice Gomes de Araujo

2012/2018 Graduação em Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a oportunidade de estudar em uma das melhores universidades do país.

Ao meu pai e ídolo Ranieri, que durante sua vida dedicou todo o seu esforço para que eu pudesse realizar meu sonho.

A minha mãe Alice, que me apoiou a focar em meus objetivos e me deu forças para não desistir.

Ao Orientador Dr. Daniel Travieso Pedroso e coorientador Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior, pelo tempo, dedicação e orientação cedida para o desenvolvimento do trabalho de conclusão.

A minha amiga Vivian, futura Engenheira de Materiais, que me ajudou na universidade no momento mais difícil da minha vida.

Aos meus amigos da República Coidiloco, com quem convivi e compartilhei as experiências de cursar engenharia na cidade de Guaratinguetá.

A todos os funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, por me oferecerem uma ótima estrutura de ensino e aprendizado.

A todos os familiares e amigos que de certa forma estiveram envolvidos no desenvolvimento da minha graduação, dedico os méritos por esse trabalho.

RESUMO

A alta disponibilidade de bagaço de cana no cenário brasileiro, torna atrativo o emprego dessa biomassa como fonte de energia em sistemas avançados de termoconversão para a obtenção de energia no setor sucroalcooleiro. O método de gaseificação por fluxo de arraste é uma boa opção para a valorização energética dessa biomassa, pelo fato desse tipo de reator apresentar alta eficiência e ser bem estabelecido no cenário comercial internacional. Para alimentação desse tipo de reator, é necessário um pré-condicionamento da biomassa através do processo de torrefação. Ao longo desse trabalho, foi realizado um estudo teórico da torrefação como uma nova tecnologia de pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar, capaz de condicionar esta biomassa originada no processo da usina sucroalcooleira, e dar solução aos problemas técnicos existentes ao alimentar de forma contínua um reator de gaseificação com este combustível. Foi realizada uma análise do impacto energético da incorporação deste processo na indústria, com o intuito de avaliar a viabilidade da sua introdução; considerando três casos. Em dois deles a gaseificação de biomassa integrada a um ciclo combinado é o processo empregado para a geração de energia na usina (BIG-GTCC “total”) e em um terceiro onde é empregado o ciclo na geração de energia adicional utilizando unicamente o bagaço excedente da usina (BIG-GTCC “parcial”). Conclui-se que, que a implementação de um sistema de gaseificação em fluxo de arraste com um tratamento prévio por torrefação do excedente de bagaço de cana se torna a opção mais energeticamente viável entre os casos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Torrefação. Bagaço de cana. Gaseificação em fluxo de arraste. Ciclo combinado. Energia.

ABSTRACT

The high availability of sugarcane bagasse in the Brazilian market makes the use of this biomass attractive for advance energy valorization technologies in the sugar-alcohol sector. The entrained flow gasification technology is a good option for the energetic valorization of this biomass, due to the fact that this type of reactor presents high efficiency and is well established in the international commercial scenario. To feed this type of reactor, a pre-conditioning of the biomass through the torrefaction process is necessary. In this work, a theoretical study of the torrefaction technology was carried out as a new technology for the pre-treatment of sugarcane bagasse, capable of conditioning this biomass, and to overcome the technical problems existing when continuously feeding a gasifier with this fuel. An analysis of the energy impact of the incorporation of this process in the industry was carried out, with the aim of assessing the viability of its introduction, considering three cases. In two of them the biomass gasification integrated to a combined cycle is the process used for the generation of energy in the plant (BIG-GTCC "total") and in a third case, the cycle is used in the generation of additional energy using only the excess sugarcane bagasse of the plant (BIG-GTCC "partial"). It is concluded that the implementation of a gasification system in the entrained flow gasifier with a previous treatment by torrefaction of the plant excess sugarcane bagasse is the most energetically viable option among the studied cases.

KEYWORDS: Torrefaction. Sugarcane bagasse. Entrained flow gasification. Combine cycle. Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de energia primária no Brasil 2016	23
Figura 2 - Massa específica do bagaço de cana, para diferentes valores de diâmetros	25
Figura 3 - Poder calorífico superior do bagaço com 3% de teor de açúcar, para diferentes valores de umidade	26
Figura 4 - Etapas do processo de gaseificação	30
Figura 5 - Funcionamento dos gaseificadores de leito fixo: a) Updraft, b) Downdraft	32
Figura 6 - Gaseificadores de leito fluidizado: a) leito fluidizado borbulhante, b) leito fluidizado circulante e c) gaseificação indireta	34
Figura 7 - Reator de Gaseificação Koppers-Totzek	37
Figura 8 - Esquema do processo Texaco	37
Figura 9 - Gaseificador de fluxo de arraste. Tecnologia CHOREN	38
Figura 10 - Decomposição dos constituintes da madeira em função da temperatura	41
Figura 11 - Sistema de torrefação de biomassa do Grupo Combustíveis Alternativos	43
Figura 12 - Planta de torrefação da PECHINEY Eletrometalurgia	44
Figura 13 - Sistema de torrefação de biomassa “Airless Drying”	45
Figura 14 - Esquema para processo de torrefação PECHINEY	46
Figura 15 - Esquema representativo da tecnologia de torrefação ECN	48
Figura 16 - Representação da tecnologia de Torrefação e Peletização	51
Figura 17 - Metodologia empregada na análise térmica da incorporação do sistema BIG-GTCC	56
Figura 18 - Fluxograma da Destilaria Pioneiros na safra 2005/2006	57
Figura 19 - Caso 1: Gaseificação do volume total de bagaço da usina em leito fluidizado borbulhante, e troca de queima na caldeira convencional pelo sistema Gaseificador – Turbina a Gás e Caldeira de Recuperação (BIG-GTCC “total”)	61
Figura 20 - Tecnologia de gaseificação em Leito Fluidizado Borbulhante	62
Figura 21 - Volume de controle no gaseificador em leito fluidizado borbulhante (LFB)	63
Figura 22 - Balanço de massa e balanço energético no secador de bagaço de cana de açúcar	65
Figura 26 - Volume de controle do secador de bagaço	71
Figura 27 - Volume de controle na caldeira de recuperação	72
Figura 28 - Volume de controle no queimador de bagaço	73
Figura 29 - Balanço de massa e energia no torrefator de bagaço de cana a uma temperatura de 520 K, 30 min	74
Figura 34 - Volume de controle no reator de torrefação do excesso de bagaço de cana	81
Figura 35 - Volume de controle no gaseificador em fluxo de arraste (GFA)	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do bagaço de cana	27
Tabela 2 - Composição das cinzas de bagaço de cana	28
Tabela 3 - Especificações do gás de gaseificação para uso em motores de combustão interna	30
Tabela 4 - Comparação entre reatores de leito fluidizado circulante e borbulhante	35
Tabela 5 - Mudança nas propriedades do bagaço de cana após torrefação a 523 K.	52
Tabela 6 - Propriedades da madeira, biomassa torrefeita, pellets e TOP pellets.	54
Tabela 7 - Valores referentes a moagem, produção e consumo de bagaço de cana da usina avaliada	58
Tabela 8 - Dados de operação da usina avaliada	59
Tabela 9 - Dados utilizados na análise técnica	62
Tabela 10 - Resultados obtidos no BIG-GTCC	66
Tabela 11 - Resultados da análise energética para o Caso 1.	67
Tabela 12 - Eficiências de geração de energia elétrica, calor, energia mecânica, global e a potência total gerada para o Caso 1	68
Tabela 13 - Resultados da análise energética com a utilização da gaseificação do volume total para a cana de açúcar pré-tratada por torrefação	76
Tabela 14 - Eficiências relacionadas a geração de energia elétrica, calor, energia mecânica, global e potência total gerada com o emprego do sistema definido pelo Caso 2	Erro! Indicador não definido.
Tabela 15 - Turbina a gás selecionada e seus parâmetros.	83
Tabela 16 - Resultados da análise energética com a implementação da gaseificação do volume de bagaço de cana em excesso da usina.	84
Tabela 17 - Eficiências relacionadas a geração de energia elétrica, calor, energia mecânica, global e potência total gerada quando gaseificado o volume em excesso de bagaço de cana da usina.	85

LISTA DE SÍMBOLOS

$(\text{CO}_2)_e$	Dióxido de carbono equivalente	[kg/kg _{com}]
$C_{p_{ar}}$	Calor específico do ar à pressão constante	[kJ/kg.K]
C_p	Calor específico dos gases de exaustão na turbina gás	[kJ/kg.K]
$E_{comb(BE)}$	Potência suprida pelo bagaço excedente	[kW]
$E_{comb(GSBE)}$	Potência suprida pelo gás de síntese com bagaço excedente	[kW]
$E_{P(TG)}$	Potência Elétrica produzida na turbina a gás com bagaço excedente	[kW]
E_{comb}	Potência suprida pelo combustível	[kW]
$E_{Bagúmido}$	Potência suprida pelo bagaço úmido	[kW]
$E_{comb \text{ Gás de Síntese}}$	Potência suprida pelo gás de síntese	[kW]
$E_{combBagTorref}$	Potência suprida pelo bagaço torrefeito	[kW]
E_{te}	Potência elétrica total	[kW]
E_{tg}	Potência de eixo da turbina a gás	[kW]
E_{tge}	Potência elétrica da turbina a gás	[kW]
E_{tve}	Potência elétrica do turbogerador	[kW]
$E_{caldeira}$	Potência disponível nos gases de exaustão da caldeira de recuperação	[kW]
g	Aceleração gravitacional	[m/s ²]
h	Entalpia	[kJ/kg]
h_o	Entalpia do estado morto	[kJ/kg]
h_{ag}	Entalpia específica do agente de gaseificação	[kJ/kg]
h_e	Entalpia específica na entrada do volume de controle	[kJ/kg]
h_{fg}	Entalpia de vaporização da água	[kJ/kg]
h_s	Entalpia específica na saída do volume de controle	[kJ/kg]
h_{vapor}	Entalpia do vapor de água	[kJ/kg]
Δh_{ar}	Variação de entalpia do ar	[kJ/kg]
Δh_{cinzas}	Variação de entalpia das cinzas	[kJ/kg]
Δh_g	Variação de entalpia do gás de síntese	[kJ/kg]
$\Delta h_{voláteis}$	Variação de entalpia dos voláteis	[kJ/kg]
K_{ar}	Relação de calor específico para o ar	[-]
K_g	Relação de calor específico para o gás	[-]

$\dot{m}$	Fluxo mássico	[kg/s]
$\dot{m}_{bg}$	Fluxo mássico do bagaço disponível na usina	[kg/s]
$\dot{m}_{bagúmido}$	Fluxo mássico do bagaço úmido	[kg/s]
$\dot{m}_{bge}$	Fluxo mássico de bagaço excedente	[kg/s]
$\dot{m}_{BagTorref}$	Fluxo mássico de bagaço torrefeito	[kg/s]
$\dot{m}_{GásdeSíntese}$	Fluxo mássico do gás de síntese	[kg/s]
$\dot{m}$	Fluxo mássico de gases de exaustão da caldeira de recuperação	[kg/s]
$\dot{m}_{TN}$	Fluxo mássico total do bagaço necessário para satisfazer o requerimento de vapor da usina	[kg/s]
$\dot{m}_{ag}$	Vazão mássica do agente de gaseificação na entrada do reator	[kg/s]
$\dot{m}_{ar}$	Vazão mássica de ar	[kg/s]
$\dot{m}_{biomassa}$	Vazão mássica de biomassa na entrada do reator	[kg/s]
$\dot{m}_{cinzas}$	Vazão mássica de cinzas na saída do reator	[kg/s]
$\dot{m}_{gás}$	Vazão mássica de gás de síntese	[kg/s]
$\dot{m}_{vapor}$	Vazão mássica de vapor de água	[kg/s]
$\dot{m}_e$	Vazão mássica que entra no volume de controle	[kg/s]
$\dot{m}_s$	Vazão mássica que sai do volume de controle	[kg/s]
P	Pressão	[kPa]
PCI_{bgs}	Poder calorífico inferior do bagaço na base seca	[kJ/kg]
$PCI_{bgTorref}$	Poder calorífico inferior do bagaço torrefeito	[kJ/kg]
$PCI_{voláteis}$	Poder calorífico inferior dos voláteis	[kJ/kg]
PCI_{bgu}	Poder calorífico inferior do bagaço com 50 % de umidade	[kJ/kg]
PCI_g	Poder calorífico inferior do gás de síntese	[kJ/kg]
ΔP_{cc}	Perda de pressão na câmara de combustão	[kPa]
ΔP_{cr}	Perda de pressão na caldeira de recuperação	[kPa]
P_o	Pressão do estado morto	[kPa]
Q_G	Perdas energéticas no gaseificador	[kW]
Q_Q	Perdas energéticas no queimador de bagaço	[kW]
Q_S	Perdas energéticas no secador de bagaço	[kW]
Q_T	Perdas energéticas no reator de torrefação	[kW]
$Q_{v.c.}$	Potência térmica no volume de controle	[kW]
Q	Potência fornecido pelos gases de exaustão	[kW]
$Q_{proc.}$	Fluxo de calor no processo	[kW]

R	Constante universal dos gases	[kJ/kg.K]
T	Temperatura	[K]
T_o	Temperatura do estado morto	[K]
W_b	Potência da bomba	[kW]
V_e	Velocidade na entrada do volume de controle	[m/s]
V_s	Velocidade na saída do volume de controle	[m/s]
W_{mec}	Potência mecânica total da usina	[kW]
$\dot{W}_{v.c.}$	Taxa de transferência de trabalho no volume de controle	[kW]
Z_e	Cota da entrada do volume de controle em relação a uma linha de referência	[m]
Z_s	Cota da saída do volume de controle em relação a uma linha de referência	[m]
z_c	Fração de carbono fixo por kg de biomassa em base seca	[%]

LETRAS GREGAS

η_e	Eficiência do gerador elétrico
η_{cald}	Eficiência da caldeira
η_{ge}	Eficiência de geração de energia elétrica
η_{ge_B}	Eficiência de Geração de Eletricidade considerando E_{comb} do Bagaço
$\eta_{ge_{GS}}$	Eficiência de Geração de Eletricidade considerando E_{comb} do Gás de Síntese
η_{gl}	Eficiência global
η_{gl_B}	Eficiência Global considerando E_{comb} do Bagaço
$\eta_{gl_{GS}}$	Eficiência Global considerando E_{comb} do Gás de Síntese
η_{tg}	Eficiência de geração da turbina a gás
η_{cr}	Eficiência da caldeira de recuperação
η_{cc}	Eficiência da câmara de combustão
$\eta_{compressor}$	Eficiência isentrópica do compressor
η_{tgiso}	Eficiência isentrópica da turbina a gás
η_{gase}	Eficiência a frio do gaseificador

SÚMARIO

CAPITULO 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS15

1.1 INTRODUÇÃO15

1.1.1 Justificativa16

1.1.2 Objetivo do trabalho17

1.1.3 Estrutura do trabalho17

CAPITULO 2 CARATERÍSTICAS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO E DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA19

2.1 SETOR SUCROALCOOLEIRO19

2.1.1 Histórico do desenvolvimento do setor sucroalcooleiro no Brasil19

2.1.2 Emprego do bagaço como fonte de energia para a cogeração no Setor Sucroalcooleiro20

2.2 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA21

2.2.1 Biomassa21

2.2.2 Situação da biomassa no Brasil, vantagens e desvantagens da sua utilização22

2.2.3 Características gerais do bagaço de cana-de-açúcar24

2.2.4 Propriedades do bagaço de cana26

2.2.5 Composição das Cinzas27

2.2.6 Teoria da gaseificação29

2.2.7 Tipos de gaseificadores e principais características de operação31

2.2.7.1 Vantagens da gaseificação em leito fluidizado35

2.2.7.2 Teoria da gaseificação em fluxo de arraste 21

2.2.7.2.1 Vantagens da gaseificador em fluxo de arraste39

CAPITULO 3 PRÉ-TRATAMENTO DO BAGAÇO DE CANA MEDIANTE A TORREFAÇÃO PARA A GASEIFICAÇÃO EM FLUXO DE ARRASTE31

3.1 TRATAMENTO DE BIOMASSA ATRAVÉS DO PROCESSO DE TORREFAÇÃO40

3.2 TECNOLOGIAS DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA, ESTADO ATUAL.42

3.2.1 A Tecnologia de Torrefação PECHINEY55

3.2.2 Tecnologia de Torrefação ECN55

3.2.3 Torrefação e Peletização55

3.3 PROPRIEDADES DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR TORREFEITO51

**CAPITULO 4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO NO BALANÇO ENERGETICO DA
INTRODUÇÃO DA TORREFAÇÃO ASSOCIADA À TECNOLOGIA BIG-
GTCC NUMA USINA SUCROALCOOLEIRA55**

4.1 REVISÃO DOS CASOS PROPOSTOS EM ESTUDOS ANTERIORES55

**4.1.1 Caso 1: Gaseificação do volume total do bagaço da usina em leito fluidizado
borbulhante e substituição da caldeira convencional pelo sistema gaseificador –
turbina a gás – caldeira de recuperação (BIG-GTCC Total)60**

**4.1.2 Caso 2: Gaseificação do volume total de bagaço da usina em fluxo de arraste e
substituição da caldeira convencional pelo sistema gaseificador – turbina a gás –
caldeira de recuperação (BIG-GTCC Total), com pré-tratamento do bagaço
mediante a torrefação68**

**4.1.3 Caso 3: Gaseificação do excedente de bagaço da usina convencional considerando
a torrefação como processo de pré-tratamento do bagaço (BIG-GTCC
“parcial”)78**

4.2 ANÁLISE DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DO CASO 1 E CASO 285

4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DO CASO 387

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES89

REFERÊNCIAS91

CAPITULO 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

Uma das principais fontes de energia no desenvolvimento sustentável é a biomassa. Ela pode ser utilizada tanto em sistemas de cogeração de energia (energia elétrica e térmica), quanto em plantas termoeletricas. Sendo dessa forma recomendada para diversos tipos de aplicações na indústria pelo alto nível de eficiência de conversão energética que é possível alcançar empregando esta fonte de energia (SILVEIRA; CARVALHO JUNIOR; VILELA, 2007; SKOULOVA et al., 2011).

Em termos de cultivo, a cana-de-açúcar está presente em mais de 80 países e podemos afirmar que os subprodutos oriundos da produção de etanol e açúcar apresentam grande potencial para ser empregado como combustível. São colhidos em torno de 1,2 Gt de cana nos principais centros produtores; e se consideramos os resíduos gerados no processo de produção de etanol e açúcar; estes resíduos podem gerar um montante de 300TWh/ano de energia elétrica (FILIPPIS, et al., 2008). Vale lembrar, que em termos de produtividade de biomassa, a cana apresenta o valor de 100t/ha, valor considerado alto.

Historicamente, as usinas de cana-de-açúcar utilizam as caldeiras para a geração de energia e vapor superaquecido, sendo o bagaço de cana-de-açúcar, com elevado teor de umidade, o combustível empregado nesse processo. A eficiência energética do processo tem sido melhorada com a introdução de melhores tecnologia no processo, sendo possível aumentar a temperatura e pressão do vapor superaquecido (BRIDGWATER, 2003). De forma geral as turbinas apresentam eficiência térmica na faixa de 15 – 30% (KUNTAL; SUDIPTA, 2014).

Existe uma crescente preocupação social ligada ao emprego de tecnologias e combustíveis que degradam o meio ambiente, e aliado a proposta de redução na emissão de poluentes criado pelo Protocolo de Quioto (UNITED NATIONS, 1998), buscam-se cada vez mais alternativas viáveis para diminuir esses complicadores. Além disso, a instabilidade política e social das principais produtoras de petróleo no mundo, acabam por reforçar uma real necessidade de diversificação da matriz energética, reduzindo de forma contínua a importância do petróleo no planeta, e dando portanto, sempre preferência para fontes de energia renováveis.

Grandes centros mundiais, como por exemplo, União Europeia, Estados Unidos, China, Japão, Índia e Brasil, se dedicam, continuamente, na busca para suprir essa dependência no

emprego de combustíveis fósseis, através da diversificação da matriz energética, e emprego de tecnologias menos poluentes (PEDROSO; KALTSCHMITT, 2012).

1.1.1 Justificativa

Um dos grandes desafios da atualidade é conseguir combustíveis renováveis com custos acessíveis, que não poluam e com aplicações economicamente viáveis. A utilização de resíduos sólidos biocombustíveis como portadores de energia é uma alternativa muito promissora no mercado na atualidade. Das opções atualmente estudadas, a gaseificação de biomassa apresenta características, que permitem o aproveitamento energético dos resíduos sólidos biocombustíveis a custos acessíveis e com baixo impacto ambiental (MACHIN, E.B, ET AL 2017, E. LARSON, 2001, REED T.B., DAS A.1998, PEDROSO, D.T, KALTSCHMITT, M. 2012; YOUNG- IL S, ET AL 2011).

A gaseificação de biomassa é um processo termoquímico, que visa transferir a energia química contida no combustível sólido a um portador energético gasoso, com mínima perda de energia. Este processo permite que os gases gerem baixo, médio ou alto poder calorífico, dependendo principalmente do tipo de reator e do agente de gaseificação. O gás combustível obtido neste processo pode ser usado para gerar calor e eletricidade, e pode ser aplicado em equipamentos convencionais, tais como motores diesel e turbinas a gás. (REED T.B., DAS A.1998)

A preparação da matéria-prima é um dos principais problemas que dificultam a implementação em grande escala da gaseificação em leito fluidizado do bagaço de cana (GABRA M. et. al., 1998). Problemas durante a preparação da matéria-prima e do processo de alimentação desta biomassa no gaseificadores de leito fluidizado em vários projetos de demonstração, têm sido descritos por vários autores que utilizaram bagaço de cana-de-açúcar como combustível, depois de empregar basicamente duas tecnologias de pré-tratamento, secagem e moagem do bagaço (GABRA M., ET. AL., 1998; GABRA M., ET. AL., 2001; E. LARSON, 2001; PELLEGRINI F. L. ET. AL., 2007; OLIVARES GOMES, E., ET. AL., 1999) ou sua peletização e moagem.

A torrefação é um processo de pré-tratamento da biomassa atraente, uma vez que pode melhorar consideravelmente as propriedades energéticas da biomassa (relação Carbono/Oxigênio), diminuir o consumo de energia no processo de moagem, além de ter um impacto positivo sobre o transporte e armazenamento, devido à natureza hidrofóbica da biomassa pré-tratada. Estudos da torrefação de alguns resíduos agroindustriais como palha de

arroz, milho e algodão têm sido desenvolvidos (ZANZI R. ET. AL., 2004; BERGMAN, P.C.A ET. AL., 2005; PIMCHUAI A., ET. AL., 2010), mas não do bagaço de cana em grande escala.

O alto consumo energético do processo é um tema que requer uma análise detalhada, dado que poderia inviabilizar a implementação a escala industrial desta tecnologia, sendo esse o principal objetivo deste estudo.

A meta é aprofundar em estudos para viabilizar a incorporação do processo de gaseificação de bagaço de cana ao tradicional setor sucroalcooleiro brasileiro para diversificar sus produtos e aumentar a oferta de eletricidade ao país desse setor.

1.1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação da viabilidade energética da implementação do sistema de torrefação de bagaço de cana para melhoria de suas propriedades físico-químicas e sua utilização em sistemas de gaseificação e ciclo combinado de Turbina a Gás – BIG-GTCC.

1.1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho foi dividido em 5 capítulos. No capítulo 1, apresentam-se a introdução e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, são apresentadas a situação atual da indústria sucroalcooleira no mundo e no Brasil e as características operacionais de uma usina convencional. Apresenta-se, também, as características fundamentais do bagaço de cana. Por fim, são analisados os conceitos fundamentais da gaseificação de biomassa, bem como os principais tipos de reatores de gaseificação e suas características de operação.

No Capítulo 3, realiza-se a análise técnica das diferentes tecnologias disponíveis para o pre-tratamento da biomassa para ser utilizada como combustível em sistemas de gaseificação. São ainda apresentados as principais tecnologias de torrefação disponíveis atualmente e as principais propriedades do bagaço torrefeito.

No Capítulo 4 é desenvolvido o balanço energético de uma usina sucroalcooleira com a tecnologia de torrefação implementada utilizando três configurações possíveis; visando avaliar a eficiência energética da implementação desta tecnologia de pre-tratamento.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões da avaliação da viabilidade energética da introdução do processo de torrefação em sistemas BIG-GTCC. Além disso, são feitas sugestões para estudos a serem realizados futuramente.

CAPITULO 2 CARACTERÍSTICAS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO E DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

2.1 SETOR SUCROALCOOLEIRO

2.1.1 Histórico do desenvolvimento do setor sucroalcooleiro no Brasil

Historicamente, por volta de 500 anos atrás, o açúcar comercializado na Europa possuía um valor extremamente elevado, e era um bem muito valioso, pelo fato de sua produção ser limitada a quantidades que não supriam toda a demanda comercial. Dessa forma, plantar cana-de-açúcar se tornou um negócio muito valioso. Apesar de ser visivelmente um negócio vantajoso, as condições climáticas europeias, não favoreciam o desenvolvimento dessa atividade (IRIYA et al., 2009). Dessa forma, impulsionados pelos avanços das Grandes Navegações do século XVI, houve uma intensa busca por terras que fossem aptas para receber a plantação de cana e consequentemente gerar produção de açúcar. No Brasil, o primeiro ciclo de cana-de-açúcar, ficou caracterizado pelo sistema de capitanias hereditárias, onde era empregada a mão de obra escrava proveniente do continente africano. O investimento dos portugueses nesse tipo de produção trouxe um retorno financeiro tão grande, que estimulou a produção do açúcar em outras regiões da América Central, por espanhóis, ingleses e franceses.

Por muito tempo o açúcar foi o produto brasileiro de maior destaque no cenário mundial, e há aproximadamente 50 anos, o Brasil se tornaria um dos grandes produtores e exportadores de derivados da cana-de-açúcar ao redor do planeta, seguido por outros grandes centros como Austrália e Índia (IRIYA et al., 2009).

Açúcar, álcool hidratado, álcool anidro, são alguns exemplos de produtos oriundos da cana-de-açúcar, com demandas e preços variados.

Nos dias atuais, há uma intensa busca em diversos países pelo desenvolvimento de uma matriz energética cada vez mais limpa e mais renovável, pelo fato de cada vez mais o petróleo estar com um preço inflacionado US\$ 63,7 o barril (oil-price.net), pelo fato de o petróleo estar em declínio produtivo, onde se é estimado uma escassez ainda neste século, e para cumprir o programa de redução de gases estufa, proposto pelo Protocolo de Quioto.

No aspecto relacionado a uso de combustível limpo, o Brasil apresenta uma posição de destaque por usar por mais de trinta anos o bioetanol e ser o país pioneiro a utilizá-lo como combustível, através da adição de álcool anidro à gasolina. Além disso, o país passou a se

destacar pelo crescente número de comercialização de veículos *flex-fuel*, que usam como combustível tanto o álcool quanto a gasolina, ou até mesmo biocombustíveis (AZEREDO, 2007).

A distribuição do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil está concentrada na região Norte-Nordeste e Centro-Sul, divididos em períodos de safra, sendo o primeiro concentrado no período de agosto/setembro de um ano até março/abril do próximo ano, e o segundo concentrado abril/maio a novembro/dezembro do mesmo ano. O principal produtor dessas regiões é considerado São Paulo, concentrando grande parte da cultura (AZEREDO, 2007).

Apesar da atividade principal da cana em relação a demanda energética seja a produção de álcool como combustíveis, os resíduos e oriundos dessa produção (bagaço, folhas e vinhaça) também podem ser utilizados para atender demandas energéticas específicas e locais, e até mesmo para venda no mercado energético (AZEREDO, 2007).

2.1.2 Emprego do bagaço como fonte de energia para a cogeração no Setor Sucroalcooleiro

Durante o processo de moagem de cana-de-açúcar, são gerados cerca 25% de bagaço de cana (250 kg em 1 tonelada de cana) como subproduto ou resíduo. Além disso é possível produzir uma quantidade equivalente a 1 MWh de energia através de um sistema de cogeração, empregando queima de aproximadamente 6,5 toneladas de bagaço (EID; CHAN; PINTO, 1998; AZEREDO, 2007). Dessa forma o emprego desse subproduto como fonte de combustível garante o sustento energético das usinas sucroalcooleiras, demandas essas relacionadas com os sistemas mecânicos dos equipamentos e componentes, iluminação e processos hidráulicos. A energia para o aquecimento, evaporação, cozimentos e destilação é fornecida pelo vapor com saída das próprias turbinas (PELLEGRINI, 2007).

Ao analisar o bagaço, podemos observar diversas vantagens que o caracterizam como uma biomassa de excelente alternativa econômica ao uso de combustíveis fósseis. As principais vantagens são: (a) o custo de produção do bagaço é quase nulo, sendo um resíduo do processo de fabricação do produto principal: açúcar e álcool. (b) O transporte, bem como o custo de produção, está organizado e implementado junto com o produto principal. (c) Possui grande produção (cerca de 25% do total da cana pode ser reaproveitada) (INNOCENTE, 2011).

As principais desvantagens relacionadas ao emprego dessa biomassa como combustível, é a elevada umidade e teor de açúcar *in natura* o que favorece a decomposição da biomassa,

impedindo que o material possa ser estocado por muito tempo. O bagaço também possui baixa densidade em sua forma “*in natura*”, o que acarreta uma menor eficiência térmica quando empregado nas caldeiras como combustível (INNOCENTE, 2011).

Quando comparada com o total de energia elétrica produzida no país de todas as fontes energéticas em 2013 (609,9 TWh), o emprego de bagaço de cana representa um total de 4,9% ou 29,8 TWh (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, MME 2014). Estudos e previsões realizadas pela Empresa de Pesquisas Energéticas, estimam que no ano de 2030 o país poderá gerar um montante de 39 TWh utilizando bagaço e palha de cana-de-açúcar.

O bagaço de cana empregado como combustível no setor sucroalcooleiro possui grande potencial energético, apresentando diversos atrativos econômicos e ambientais. Por outro lado, o potencial de geração de energia elétrica para a venda às concessionárias ainda não é aproveitado adequadamente (FIOMARI, 2004; DANTAS, LEGEY; MAZZONE, 2013; LOPES SILVA et al., 2014).

2.2 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

2.2.1 Biomassa

O termo biomassa passou a ganhar destaque nos anos 70, para identificação de materiais do meio natural que poderiam ser utilizados como fontes de combustíveis. A definição na verdade é mais abrangente e inclui toda a matéria orgânica seja ela de origem animal ou vegetal, incluindo ainda os materiais procedentes de sua transformação natural ou artificial. Em uma visão ainda mais macro, abrange toda a forma de matéria viva existente em um certo período na Terra. (BERGMAN, 2005; OLIVEIRA JUNIOR, 2014).

Por outro lado, a biomassa energética engloba os materiais que possuem capacidade de serem empregados na matriz energética. A biomassa energética é uma fonte de energia limpa e renovável, obtida por resultado do armazenamento de energia proveniente do Sol nas plantas.

Dentre todas as formas existentes de energia limpa e renovável a biomassa vegetal é a principal que armazena de forma efetiva a energia solar, sendo além disso, a principal fonte renovável de carbono, podendo ser empregada na produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos

Além desses motivos citados anteriormente, o emprego de biomassa vegetal como fonte de energia, tem gerado grande interesse científico, por possuir grande disponibilidade, custo

baixo, possibilidades de tratamento e melhoria e alto potencial energético em alguns casos.

O principal desafio enfrentado atualmente com o emprego da biomassa, é a geração de eletricidade ou geração de energia elétrica e térmica de forma simultânea (cogeração), com eficiência elevada e utilizando no processo motores de combustão interna, turbinas a vapor, turbinas a gás, ou ambos os tipos de turbinas de forma combinadas. Em termos de gaseificação de biomassa o Brasil possui alto potencial de geração de energia, que está diretamente ligado aos benefícios proporcionados pelo uso desta tecnologia em substituição da combustão direta, sempre que possível.

2.2.2 Situação da biomassa no Brasil, vantagens e desvantagens da sua utilização

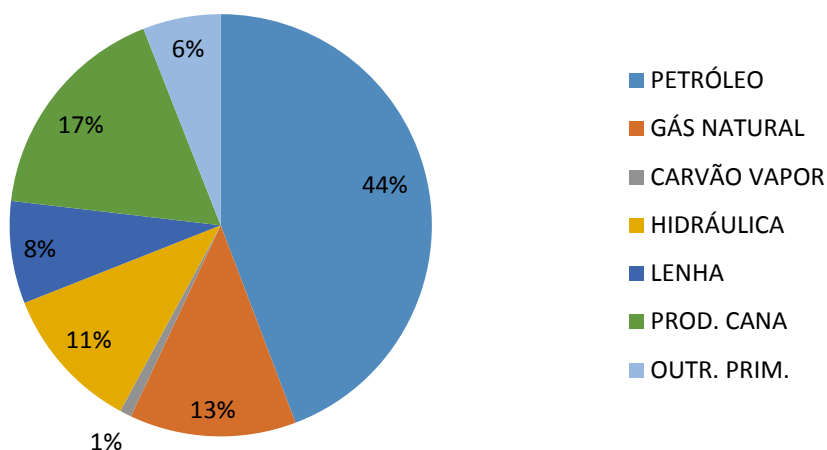
Ao longo dos anos a biomassa perdeu seu papel protagonista para o carvão mineral e pelo uso acentuado de petróleo e gás natural, sendo praticamente reduzida as regiões com atividade agrícola.

Com a crescente preocupação com questões ambientais, muitos países ao redor do mundo passaram a promover incentivos para utilização de fontes energéticas renováveis de forma a diversificar a matriz energética de forma mais limpa. A biomassa possui bom destaque quando empregada para suprir demandas relacionadas ao setor de transporte e produção de energia elétrica, desde que sejam empregadas tecnologias de conversão bem estabelecidas. A estimativa é que em torno de 20 anos, as fontes de energias renováveis representarão 30% do consumo total da matriz energética (IEA, 2016).

No ano de 2016, em termos de geração de energia primária no Brasil, a Biomassa representa 25% do total da matriz, sendo a cana-de-açúcar responsável por 17% dessa demanda. A Figura 1 representa o percentual relacionado a produção de energia primária no Brasil, no ano de 2016, segundo o Balanço Energético Nacional (MME 2017).

Figura 1 - Produção de energia primária no Brasil 2016

Produção de Energia Primária no Brasil



Fonte: Balanço Energético Nacional, MME (2017).

Algumas vantagens relacionadas ao emprego da biomassa como fonte de energia são listadas a seguir:

1. Diminuição da emissão de poluentes na atmosfera. Gases como CO_2 , principal responsável pelo efeito estufa, CO , SO_2 , que são gases tóxicos provenientes da queima de combustíveis fósseis, apresentam teores de emissão muito reduzidos quando comparado com as matrizes não renováveis. Além disso as suas cinzas são menos agressivas ao meio ambiente.
2. Além de contribuir para a diversificação da matriz energética, evitando uma dependência de fontes que estão em declínio de produção, a biomassa contribui para evitar a contaminação do solo pelo acúmulo de resíduos da atividade agrícola, além de proporcionar novas fontes de trabalho em áreas rurais.
3. No caso do bagaço de cana de açúcar, o potencial energético desse tipo de biomassa, é evidenciado pela alta disponibilidade da fonte no Brasil, o país possui vasta bagagem de conhecimento técnico e teórico a respeito da cana, o que acarreta junto com as condições climáticas favoráveis elevados índices de produtividade (VASCONCELOS,

2017), sendo capaz de gerar auto sustentação para as usinas sucro-alcooleiras. Algumas desvantagens do emprego de biomassa como fonte de energia são:

1. Quando queimada de forma indiscriminada, pode gerar malefícios a saúde, fator ligado diretamente ao fato de muitas vezes as fontes de biomassa possuírem baixa densidade energética.
2. A implementação de sistemas de operação, alimentação e manutenção relacionadas ao emprego de biomassa como tecnologia de combustível, geralmente são mais complexos tornando o custo dessa implementação mais cara.
3. No caso do bagaço-de-cana, o excesso de umidade atrapalha o desempenho do combustível. Além disso no Brasil, a efetivação desse método de energia é travado por ausência de políticas regulatórias que incentivem e fiscalizem o sistema de comercialização de excedentes energéticos.

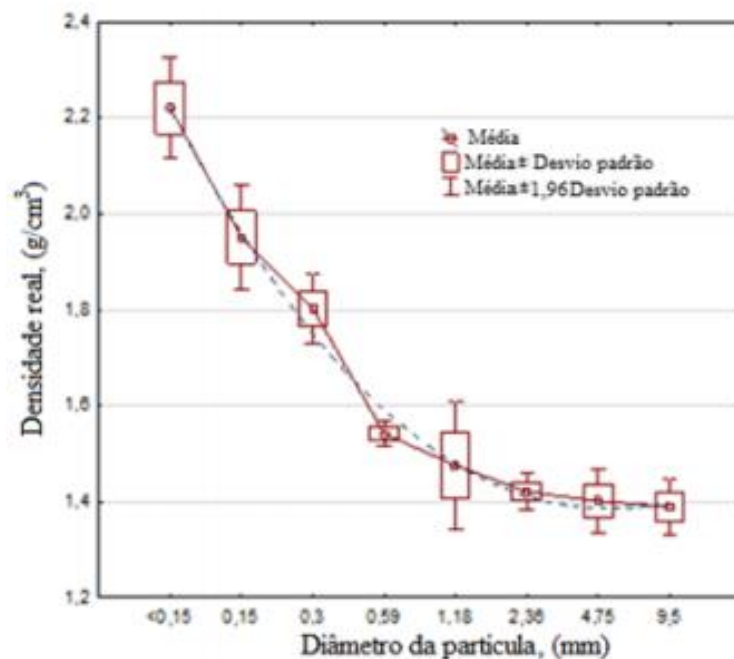
2.2.3 Características gerais do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço é conceituado como o resíduo ou subproduto obtido do processo de moagem da cana-de-açúcar. Este subproduto representa, em torno de, 30% da massa total da cana, apresentando um valor de umidade próximo de 50% (PROENZA PÉREZ et al., 2014). Em termos de resíduos presentes no cenário agroindustrial, podemos dizer que é o que se expressa em maior quantidade no Brasil, sendo estima uma produção 92 milhões de toneladas. Sua importância é ainda reforçada, pelo fato de que o material está disponível em períodos de baixa oferta energética proveniente de hidrelétricas (PROENZA PÉREZ et al., 2014).

Em torno de 30 a 35%, da estrutura fibrosa do bagaço de cana é denominada “miolo”, originada do núcleo da planta e “casca”, ou fibra. A composição da fibra é designada em média de 50% de celulose, 25% de hemicelulose e o restante é composto de lignina (PROENZA PÉREZ et al., 2014).

A massa específica do bagaço de cana varia de acordo com sua variação de diâmetro. A Figura 2 representa a variação da massa específica do bagaço, pode-se entender que o material tem uma tendência de aumentar a massa específica na medida que diminui-se o diâmetro (PROENZA PÉREZ et al., 2014). Os valores de massa específica ficaram compreendidos entre 2,2 - 1,4 g/cm³ na análise feita.

Figura 2 - Massa específica do bagaço de cana, para diferentes valores de diâmetros.

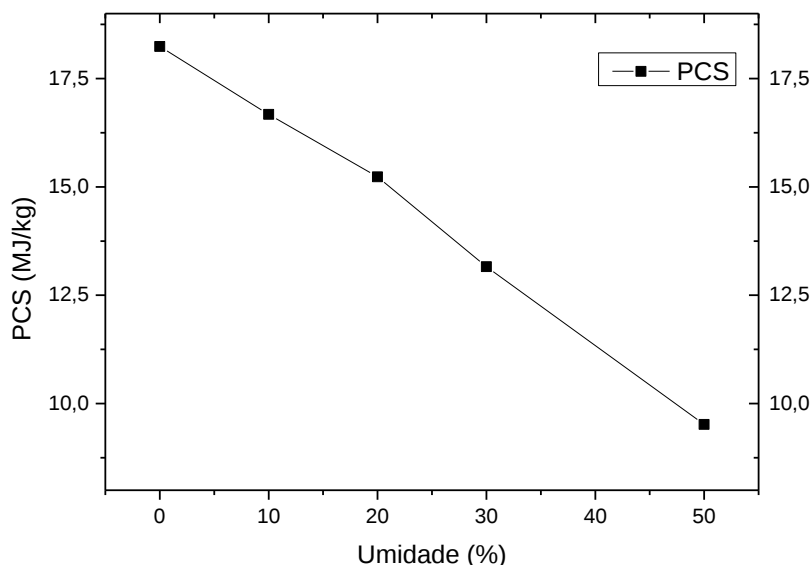


Fonte: Proenza Pérez et al. (2014).

O poder calorífico de um material é definido como a quantidade de calor produzida por 1 kg de certo combustível (REED; DAS, 1998). Podendo ser caracterizado o Poder Calorífico Superior: quantidade de calor produzida por 1 kg do combustível quando ele entra em combustão, e os gases da descarga são resfriados até que o vapor de água presente neles seja condensado; ou o Poder Calorífico Inferior: quantidade de calor produzida por 1 kg do combustível, mas nesse caso os gases de descargas são resfriados até a ebulição da água.

Apresenta-se na Figura 3 a variação do poder calorífico superior em função dos valores de umidade para o bagaço de cana-de-açúcar (BACCI; DA SILVA; MORAIS, 2008).

Figura 3 - Poder calorífico superior do bagaço com 3% de teor de açúcar, para diferentes valores de umidade.



Fonte: Bacci; Da Silva; Moraes (2008).

2.2.4 Propriedades do bagaço de cana

As principais propriedades de combustão do bagaço-de-cana, dependem diretamente da composição do material, bem como sua consistência e poder calórico. Além disso, tem ligação explícita com as condições de produção da cultura de cana, como o solo, clima, forma de colheita, limpeza e eficiência do maquinário na extração de suco. As principais características físico-químicas do bagaço de cana-de-açúcar podem ser visualizadas através da Tabela 1 pelas amostras A1 (P. REIN, 2007), A2 (C.A. CAMARGO; H.A. USHIMA, 1992), A3(B.M. JENKINS, 1998), A4 (IPT, 2007), A5 (P. FILIPPIS, C. BORGIANNI, M. PAOLUCCI, F. POCHETTI, 2008), A6 (G.M. PEREZ; A. CHAALA; C. ROY, 2002), A7 (T.R. MILES, 1995), A8 (F. A.AGBLEVOR, H. L. CHUM, D. K. JOHNSON, 1992), A9 (E. NATARAJAN, 1998).

Podemos dizer que essa biomassa, apresenta alta reatividade por possuir altos índices de componentes voláteis e baixo teor de cinzas. O poder calorífico inferior do bagaço pode ser comparado com os valores especificados em tipos de biomassas lenhosas (IPT, 2007), tornando esse material uma boa forma de matéria prima a ser empregada não processo de gaseificação.

Tabela 1 - Composição do bagaço de cana

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
Análise Aproximada									
Voláteis (% peso, base seca)	87,06	83,0	85,61	83,0	88,7	82,1	85,43	79,35	n.a
Carbono fixo (% peso, base seca)	12,94	13,0	11,95	13,0	9,3	16,3	12,89	17,88	n.a
Cinzas (% peso, base seca)	n.a.	4,0	2,44	1,9	2,0	1,6	1,68	3,66	6,8
Poder Calórico Superior (MJ. kg ⁻¹ , base seca)	18,6	18,9	18,99	n.a	18,7	19,19	19,14	19,41	18,85
Análise Elementar (% peso, base seca)									
C	47,0	46,3	48,65	45,48	42,9	48,81	49,0	48,4	46,7
H	5,9	6,4	5,87	5,70	5,9	6,00	5,87	6,01	6,2
O (diferença)	45,81	43,0	42,82	45,21	49,0	43,1	43,27	41,61	39,8
N	0,33	n.a.	0,16	0,40	0,20	0,46	0,1	0,17	0,2
S	0,05	0,1	0,04	0,06	n.a.	0,1	0,06	0,02	0,02
Cl	n.a.	n.a.	0,03	n.a.	n.a.	<0,01	0,02	n.a.	0,06

A1-A9: Amostras de bagaços de vários autores

Fonte: Machin et al. (2014).

A baixa densidade e formas físicas do material, dificultam a fluidização do bagaço de cana, de forma que quanto maior o tamanho da partícula mais fácil será para o agente de fluidização escapar entre os canais criados por o bagaço no leito do reator.

2.2.5 Composição das cinzas

O bagaço de cana-de-açúcar possui em sua composição química baixa quantidade de sais alcalinos, o que torna mais apto o emprego dessa biomassa em gaseificadores. Os sais alcalinos são responsáveis pela formação de dejetos indesejáveis na superfície dos gaseificadores, e por apresentarem alto índice de reflexão e baixa condutividade térmica, diminuem consideravelmente a taxa de transferência de calor.

Na extração do suco da cana-de-açúcar, boa parte desses componentes indesejáveis ao processo de termoconversão são removidos. Essa remoção resulta em uma composição de

bagaço que pode ser analisada na Tabela 2 (MACHIN et al,2014), demonstrando a boa empregabilidade do produto como combustível.

Tabela 2 - Composição das cinzas de bagaço de cana

	Análise Elementar [% do peso das cinzas]									
	SiO₂	CaO	MgO	Fe₂O₃	Al₂O₃	Na₂O	K₂O	SO₃	P₂O₅	TiO₂
A1	45,88	4,31	3,22	15,45	20,55	0,96	1,67	0,40	0,89	3,77
A2	46,88	5,35	5,81	7,98	11,4	2,45	9,81	5,08	5,04	1,39
A3	46,61	4,47	3,33	14,14	17,69	0,79	0,15	2,08	2,72	2,63
A4	73,19	4,14	2,53	5,37	8,29	0,67	4,11	n.d.	0,91	n.d.
A5	84,0	1,2	1,7	1,8	3,6	0,9	2,3	0,9	n.d.	0,3

A1-A5: Amostras de cinzas de vários autores. n.d.: Não disponível

Fonte: Machin et al. (2014).

A quantidade de óxidos alcalinos presentes em um certo combustível pode ser mensurada através do índice de alcalinos Equação 1:

$$IA = \frac{kg(K_2O + Na_2O)}{GJ} \quad (1)$$

Por meio da Equação (1) que podemos mensurar a possibilidade de incrustações. Valores compreendidos entre 0,17 a 0,34 kg/GJ indicam que é provável que ocorram incrustações durante o processo. Valores acima de 0,34 kg/GJ indicam possibilidade elevada do problema ocorrer. Assim como valores abaixo de 0,17 kg/GJ indicam baixa possibilidade de incrustações (DAYTON et al., 1999). O bagaço de cana, apresenta um índice próximo a 0,06 kg/GJ, valor dentro dos padrões recomendados.

Apesar de apresentar um bom índice alcalino, o principal problema do emprego do bagaço em gaseificadores, está relacionado com sua composição física, sendo necessária uma redução de sua umidade e homogeneização do material antes de seu emprego como combustível nesse tipo de reator. Alguns processos de tratamento são empregados para preparar o bagaço e torna-lo viável nesse tipo de processo. Entre eles, os mais utilizados são a

secagem e a moagem do bagaço (LARSON, 2001; OLIVARES GOMES et al., 1999; PELLEGRINI; OLIVEIRA JUNIOR, 2007) ou sua peletização e moagem (SILVEIRA et al., 2006; SILVEIRA; CARVALHO JUNIOR; VILELA, 2007).

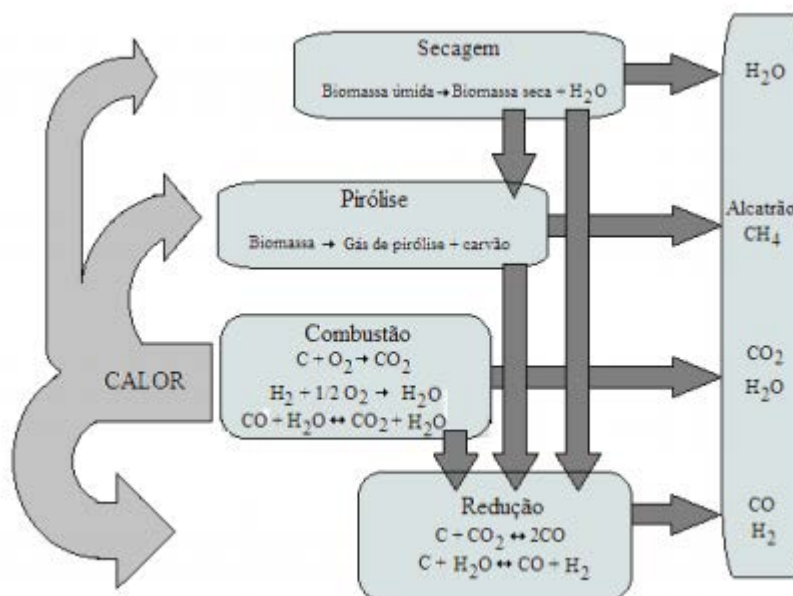
2.2.6 Teoria da gaseificação

O processo de gaseificação é um processo termoquímico que tem como objetivo a transferência da energia química contida em um combustível sólido o líquido a um portador energético gasoso com o mínimo de perdas energéticas. Esse procedimento é realizado através de inúmeras reações químicas em altas temperaturas com presença de agente oxidante, geralmente o ar, oxigênio, vapor ou até mesmo uma mistura desses componentes (PUIGARNAVAT; BRUNO; CORONAS, 2010). Trata-se de uma das tecnologias que apresentam ótimos resultados na conversão de biomassa, possibilitando essa matéria-prima em ser empregada como gás combustível em diversos tipos de aplicações como fornos, motores de combustão interna, para gerar trabalho. O processo em si, é realizado dentro de 4 etapas:

- 1- Secagem, processo endotérmico onde ocorrerá a redução da umidade da biomassa. A temperatura desse processo varia entre 100–200°C (PUIGARNAVAT; BRUNO; CORONAS, 2010).
- 2- Numa etapa posterior ocorrerá a pirólise, onde a biomassa sofrerá uma decomposição térmica em ausência de oxigênio, em desencadeada por reações de alta complexidade com temperaturas entre 350–600°C (BRIDGWATER, 2003).
- 3- Em seguida ocorre o processo de combustão com uma temperatura entre 700 a 900°C, sim utilizado o ar como agente oxidante (PUIGARNAVAT; BRUNO; CORONAS, 2010).
- 4- Por último ocorre o processo de redução, acarretando as reações de gaseificação homogêneas (gás-gás) e heterogêneas (gás-sólido), onde o carvão reage com o oxigênio, vapor de água, hidrogênio, dióxido de carbono e alcatrão. A composição final do gás depende do combustível, da temperatura, as concentrações dos gases que reagem e do agente gaseificador que está sendo empregado durante o processo (PUIGARNAVAT; BRUNO; CORONAS, 2010).

Na Figura 4, podem ser observadas as etapas do processo de gaseificação.

Figura 4 - Etapas do processo de gaseificação.



Fonte: Andrade (2007).

O gás proveniente do resultado do processo de gaseificação pode ser empregado para diversas finalidades, dependendo da sua características.

Tabela 3 - Especificações do gás de gaseificação para uso em motores de combustão interna

Parâmetros	Unidade	Aceitável	Ótimo
PCI do gás	kJ/Nm ³	> 2500	> 4200
Teor de material particulado	mg/Nm ³	< 50	< 5
Tamanho das partículas	µm	<10	< 1,0
Teor de alcatrão	mg/Nm ³	< 500	< 100
Ácido acético	ppm	< 50	0
Ácido clorídrico	ppm	< 500	0

Fonte: Van De Beld (2001).

Foram padronizadas especificações necessárias para que esses gases poderem ser empregados nos motores de combustão modernos, essas especificações são observadas na Tabela 3 (VAN DE BELD, 2001).

2.2.7 Tipos de gaseificadores e principais características de operação

Os reatores de gaseificação podem ser agrupados em diferentes tipos de classificação mediante a vários aspectos, como a temperatura do leito, relação entre o agente gaseificante-combustível, pressão no reator, formação de cinza e tipo de leito. Em termos de temperatura podem ser separados como gaseificadores de média temperatura (em torno de 1123 K), produzindo gás de poder calórico na faixa de 4 a 7 MJ/Nm³; e reatores de alta temperatura (na faixa de 1500 a 1800 K), produzem um gás de poder calórico elevado (10 a 18 MJ/Nm³). Os gaseificadores de alta temperatura possuem baixo teor de hidrocarbonetos, diferentemente dos gaseificadores de temperatura média que possuem alta concentração, (CH₄, C₂H₄ e C₆H₆) (SANCHEZ; SILVA; GOMES, 2008).

Em termos de eficiência, o gaseificador de fluxo de arrasto é o que apresenta melhor desempenho. Esse tipo de gaseificador opera em pressões elevadas (próximo a 3000 kPa) para maximizar a eficiência do processo. O oxigênio diluído com vapor é utilizado como agente de gaseificação nesse caso. O reator busca operar sempre acima da temperatura de fusão das cinzas de forma a manter esta na fase líquida (VREUGDENHIL; DRIFT; MEIDJEN, 2009).

Os reatores de temperatura média, podem ser classificados em determinação do seu leito, podem ser gaseificadores de leito fixo e gaseificadores de leito fluidizado. Os reatores de leito fixo por sua vez podem ser caracterizados como fluxo descendente, ou Downdraft, e gaseificadores de fluxo ascendente, ou Updraft. Ambos os casos (fluxo ascendente ou descendente) são comumente utilizados no processo de gaseificação de biomassa. A noção do princípio de operação do Downdraft e Updraft, pode ser observado na Figura 5.

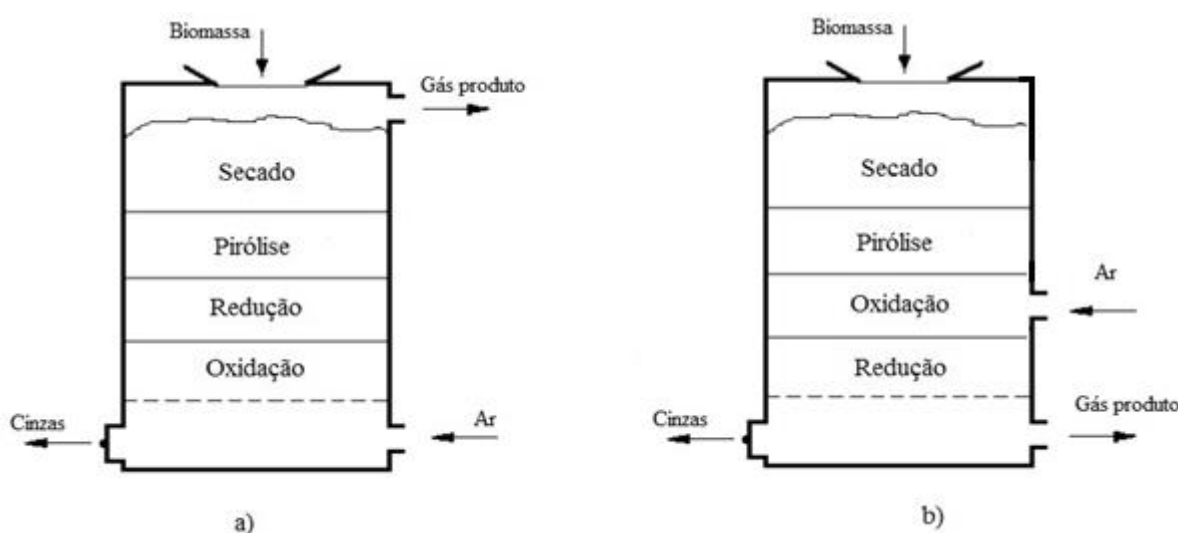
Os gaseificadores de leito fixo de fluxo descendente, são mais utilizados para geração de energia em pequena escala. Apresentam um baixo teor de material particulado, e consequentemente menor teor de incrustações; além de produzir um gás com baixo teor de alcatrões. A tecnologia empregada é simples, quando comparada com outros processos. Esses gaseificadores são sensíveis a variação no teor da umidade e as dimensões do combustível empregado.

Nos casos de reatores de leito fixo, são necessárias fontes de combustíveis uniforme afim de manter a operação segura. As cinzas presentes no inferior dos gaseificadores podem conter alto teor de carbono, pelo fato do combustível empregado na seção de gaseificação não ser completamente convertido.

Os gaseificadores de leito fixo de fluxo ascendentes são indicados para dimensionamento em escala industrial, possuem menor sensibilidade em relação a variação da

umidade e forma física do combustível, porém possuem maior quantidade de alcatrão produzido. Se esse alcatrão for retirado do processo, é possível que o gás seja queimado em motores de combustão interna. O processo de limpeza do alcatrão encarece consideravelmente o emprego desta tecnologia, visto que além de limpar o sistema de gaseificação, a água quando empregada no processo de limpeza do gás, também necessita ser tratada, evitando que as impurezas alcancem as redes de esgoto.

Figura 5 - Funcionamento dos gaseificadores de leito fixo: a) Updraft, b) Downdraft.



Fonte: Machin, E. B. (2017).

Em geral os gaseificadores de biomassa de leito fixo, são executados em modo seco, ou seja, a cinza não atinge o seu ponto de fusão. Em ambos os casos de leito fixo, é utilizado o ar como agente de gaseificação. Esse tipo de tecnologia não é considerado como opção viável para produção de gás de síntese de biomassa, pelo fato de não conseguirem produção de um gás livre de nitrogênio, e pelo fato da presença de alcatrões no gás combustível.

Os gaseificadores de leito fluidizado, são mais viáveis para produção de gás de síntese de biomassa no sentido que produzem um gás pobre ou até mesmo livre de nitrogênio. A tecnologia propõe uma larga escala de produção de energia. Este tipo de reator vem sendo utilizado há um bom tempo, e sua vantagem em relação aos gaseificadores de leito fixo, são a temperatura uniforme atingida na região de gaseificação e a reação de gaseificação ocorre de forma mais rápida (RAJ; GOIC, 2011).

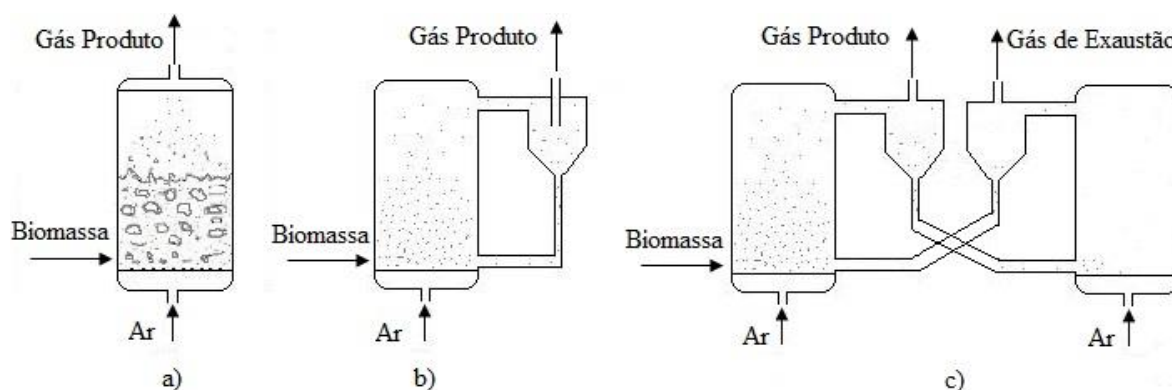
Nestes tipos de reatores o agente gaseificante circula no seu interior, em uma taxa que o leito apresenta uma característica denominada de estado de fluidização, acarretando no

interior do gaseificador, condições mais favoráveis para a transferência de calor e material entre o gás e o combustível empregado. Além disso, o agente gaseificante possui velocidade suficiente para manter as partículas do leito em suspensão. As partículas do combustível são introduzidas no momento em que o leito é aquecido e atinge uma temperatura elevada. As partículas conseguem desta forma, atingir a temperatura equivalente no interior do leito em alta velocidade. Apesar disso, para o bom funcionamento dessa tecnologia, a biomassa empregada no sistema deve possuir pequenas dimensões (<6 mm) e baixo teor de umidade (<30% do seu peso) (BASU, 2006).

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser divididos em sub-categorias: leito fluidizado borbulhante (LFB), leito fluidizado circulante (LFC) e gaseificação indireta com leito duplo. Todos esses tipos de reatores utilizar um material que não reage no leito, muitas vezes sendo utilizado, areia, cinzas de combustível. O objetivo desse material é tornar a temperatura do processo uniforme ou homogênea, distribuindo e transportando o calor no interior do reator, misturar o combustível com o agente gaseificante e os gases produzidos no processo, e inclusive reduzir a concentração de alcatrão. Na Figura 6 podemos analisar um esquema básico de funcionamento de três gaseificadores de leito fluidizado (CIRCE, 2005).

No gaseificador de leito fluidizado borbulhante, a alimentação do combustível é realizada na altura da base do leito. O material do leito é tornado fluido através do agente gaseificante que entra no interior do reator por bicos distribuídos na parte inferior do sistema. A velocidade de fluidização do agente gaseificante é baixa. O oxigênio é utilizado no leito para efetuar o processo de combustão do gás, a fim de produzir energia necessária para o início das reações termoquímicas implementadas no processo. O tamanho do reator fica um pouco limitado, pois é necessária uma distribuição adequada do combustível no interior do leito, fato que é dificultado pelo aumento do diâmetro do gaseificador.

Figura 6 - Gaseificadores de leito fluidizado: a) leito fluidizado borbulhante, b) leito fluidizado circulante e c) gaseificação indireta.



Fonte: Machin, E. B. (2017).

Nos gaseificadores de leito fluidizado circulantes, a velocidade de fluidização é mais elevada, e por conta disso, o material no interior do leito é arrastado, o leito, portanto precisa de uma circulação afim de se obter a máxima conversão possível do combustível. A velocidade do agente gaseificante é muito mais elevada do que no processo de leito fluidizado borbulhante. As partículas do combustível utilizado no processo que não forem completamente convertidas são retiradas do processo, através de um ciclone e outros dispositivos adequados para separação. As partículas retornam para o fundo do reator através de uma válvula não mecânica, válvula essa muitas vezes estabelecida por um tubo que preveni escape de gás na parte inferior do processo de separação.

Na Tabela 4 podemos observar um comparativo entre os tipos de reatores de leito fluidizado: Circulante e Borbulhante (WILLIAMS, 1996).

No processo de gaseificação indireta, a combustão do carvão remanescente e a gaseificação da biomassa, ocorrem em reatores separados. No primeiro reator a biomassa que é inserida é convertida em carvão e gás. A energia em forma de calor necessária para que o processo ocorra é transmitida através do material do leito circulante e é transportada do segundo reator de combustão. O carvão e o material do leito são separados por um ciclone ou por outro dispositivo de separação indicado para o processo. O gás produzido no processo sai do reator e passa pelo processo de limpeza.

Tabela 4 - Comparação entre reatores de leito fluidizado circulante e borbulhante

Reator de leito fluidizado	Temperatura [K]		Biomassa	Alimentação	Agente gaseificante	Teor de Alcatrão
	Reação	Saída				
Borbulhante (LFB)	973-1273	973-1073	Lascas de madeira, restos de espigas de milho, casca de arroz.	Diretamente na área do leito	A parte inferior do gaseificador	Médio alto
Circulante (LFC)	973-1273	873-1073	Bagaço de cana-de-açúcar, lascas de madeira, casca de arroz, serragem.	Diretamente na área do leito	A parte inferior do gaseificador.	Baixo

Fonte: Williams (1996).

2.2.7.1 Vantagens da gaseificação em leito fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado apresentam melhor controle da temperatura no processo, sendo esta mais homogênea; melhor controle de taxas de reação, permitindo um bom monitoramento; maior eficiência energética, sendo capaz de produzir energia em grande escala; fácil de empregar tipos variados de biomassa como combustível; baixa sensibilidade à variação de umidade. (ZAINAL et al., 2010).

2.2.7.2 Teoria da gaseificação em fluxo de arraste

Nos gaseificadores de fluxo de arraste, o combustível empregado pode ser introduzido em conjunto com o oxigênio, ar ou uma mistura de oxigênio e vapor d'água. A maior parte da escória é coletada em uma zona. Os produtos resultantes do processo, saem a uma temperatura elevada e necessitam passar por resfriamento antes que a limpeza do gás combustível seja realizada, o que acarreta uma perda eficiência térmica no sistema. O dispositivo desta tecnologia é consideravelmente compacto, o tempo de reação é considerado baixo pelo fato do processo apresentar elevadas temperaturas de operação (1300 a 1800K), e a tecnologia produz pouco metano (LARSON; WILLIAMS; REGIS, 2001). A Texaco, foi a empresa que utilizou a tecnologia mais difundida comercialmente para a produção de gás de

síntese. Além da Texaco, outras empresas como a Destec e a Shell, desenvolveram outros gaseificadores com tecnologia em leito de arraste.

Os projetos estabelecidos por essas tecnologias possuem capacidade de processamento de até 2000 t/dia de biomassa (SÁNCHEZ; SILVA; GOMES, 2008), e apesar de possuírem menor eficiência térmica quando comparado com os gaseificadores de leito fixo e fluidizado, o gás resultante do processo possui menor concentração de alcatrão, compostos nitrogenados e hidrocarbonetos pesados.

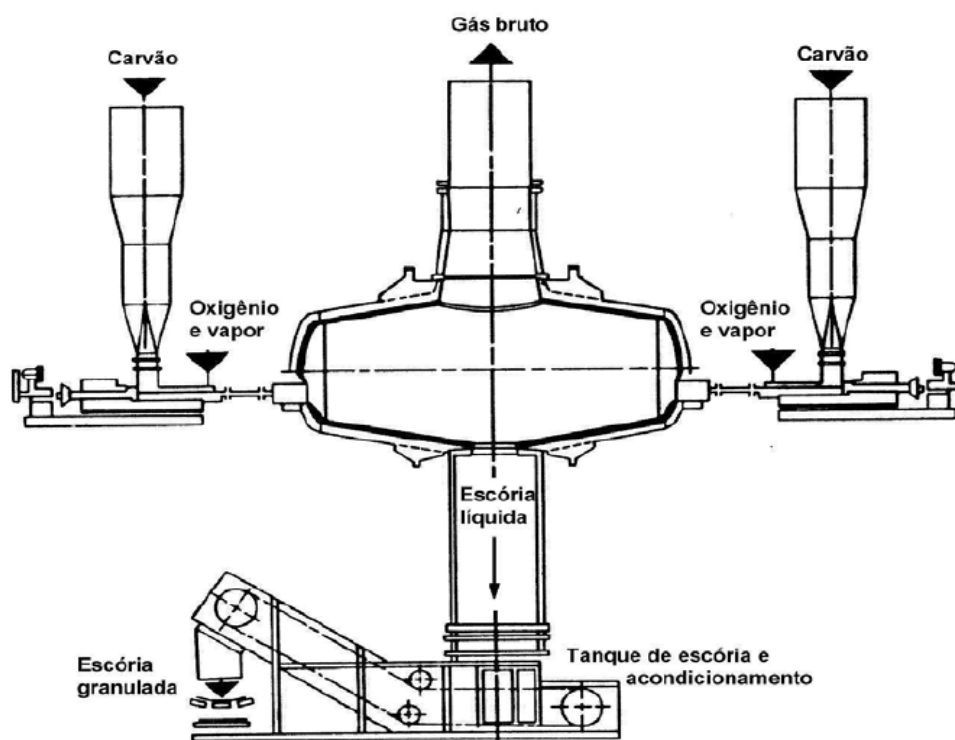
Nos Estados Unidos e em alguns países europeus, os reatores de gaseificação em fluxo de arraste tem sido utilizado para implementação de sistemas BIG-GTCC, utilizando carvão mineral como fonte de combustível de alimentação. Podem ser citados como exemplo, os seguintes reatores de fluxo de arraste (SÁNCHEZ; SILVA; GOMES, 2008):

- Gaseificador Koopers-Totzek: Considerado o reator de fluxo de arraste mais importante em operação. Através da Figura 7, o reator Koopers- Totzek é ilustrado. O gaseificador processa a biomassa, a uma temperatura mais elevada que outros reatores e trabalha sob pressão atmosférica. Cada cabeça possui dois queimadores e o gaseificador é envolto de uma camisa de água e material com propriedade refratária. No centro do reator é realizada a remoção das cinzas fundidas.

- Gaseificador Texaco: Desenvolvido nos Estados Unidos, o reator consiste em um cilindro vertical sob alta pressão, envolto de um material com propriedade refratária, e trabalha preferencialmente com uma mistura de carvões betuminosos e água. O esquema de funcionamento do reator da Texaco pode ser analisado na Figura 8. Em termos comerciais, o gaseificador produz gás de síntese para a manufatura de anidrido acético e metanol.

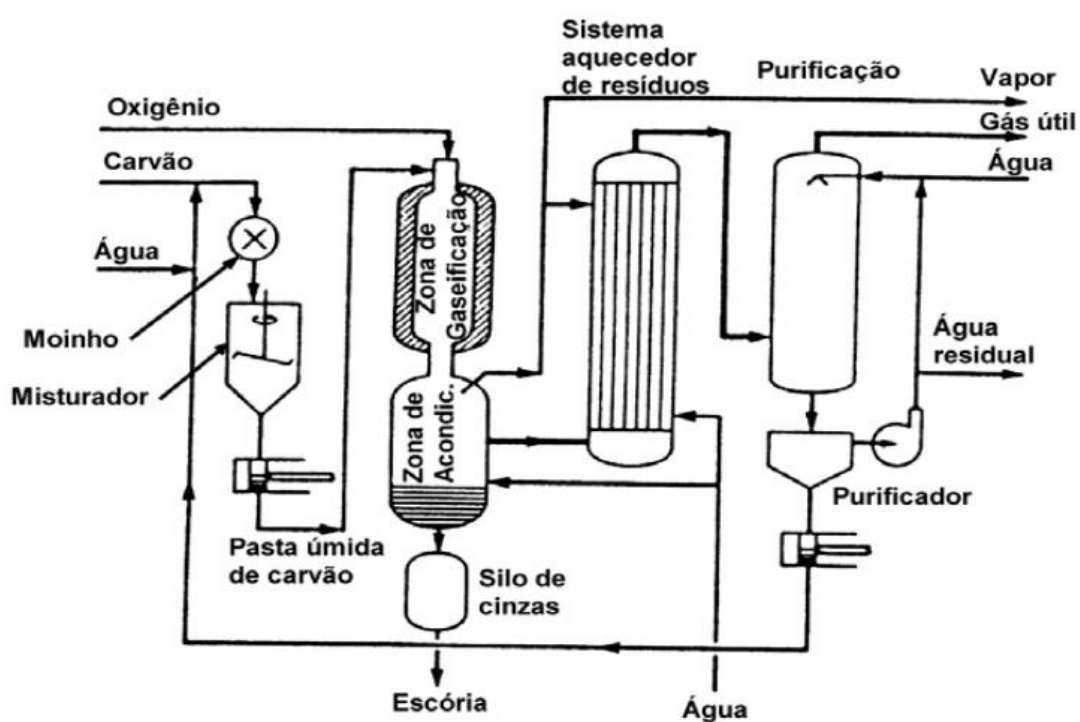
- Gaseificador Otto-Rummel: Assim como o reator Koopers-Totzek, este gaseificador também trabalha a pressão atmosférica e seu processo é dividido em três etapas. No inferior do dispositivo, o carvão é seco e pulverizado, sendo em seguida injetado em conjunto com oxigênio e vapor d'água. Na etapa intermediária é aonde ocorrem as reações de gaseificação. O gás produzido é coletado e refrigerado na parte superior do reator.

Figura 7 - Reator de Gaseificação Koppers-Totzek.



Fonte: Sánchez; Silva; Gomes (2008).

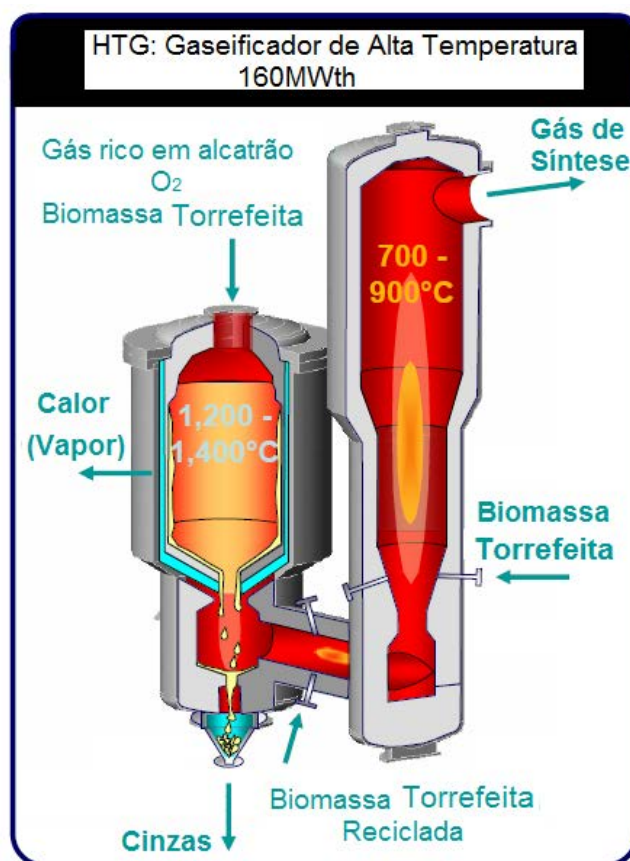
Figura 8 - Esquema do processo Texaco.



Fonte: Sánchez, et al. (2008).

- Gaseificador Shell-Koppers: Possui configuração semelhante ao gaseificador Koopers-Totzek, porém possui eficiência térmica mais elevada, e trabalha sob pressões maiores. Existem duas plantas com capacidade de processamento de 1000 t/dia de biomassa, instaladas na Holanda e na Alemanha.
- Gaseificador CHOREN: Trata-se de uma das tecnologias de gaseificação de maior eficiência, alcançando um valor próximo de 81% de eficiência no gás frio (WORLEY; YALE, 2012). Os requisitos principal dessa tecnologia, é que o combustível empregado necessita possuir pequeno tamanho (menor que 6 mm) e baixo teor de umidade. Observando a Figura 9 é possível visualizar a tecnologia empregada no Gaseificador CHOREN.

Figura 9 - Gaseificador de fluxo de arraste. Tecnologia CHOREN.



Fonte: Worley; Yale (2012).

2.2.7.2.1 Vantagens da gaseificador em fluxo de arraste

- O gás produzido pelo reator possui baixa concentração de alcatrão e metano, fato esse, proporcionado pelas elevadas temperaturas de operação, que podem chegar acima de 1300 °C, além de teores elevados de CO e H₂.
- Possui boa capacidade de processar materiais de menores dimensões (biomassa torrefeita, pellets, bio-óleo).
- Altas pressões e elevada potência.
- Sistema de remoção de cinzas fundidas.

Avaliando a complexidade física do bagaço de cana de açúcar, e conforme citado anteriormente, trata-se de um combustível de difícil utilização em gaseificadores de leito fluidizado, neste capítulo fica expressa a possibilidade de se processar essa biomassa em gaseificadores de fluxo de arrasto, preferencialmente em um do tipo CHOREN, mediante ao tratamento por torrefação. Deste modo o bagaço de cana estaria apto para alimentar o gaseificador e obter maiores resultados de eficiência.

CAPITULO 3 PRÉ-TRATAMENTO DO BAGAÇO DE CANA MEDIANTE A TORREFAÇÃO PARA A GASEIFICAÇÃO EM FLUXO DE ARRASTE

3.1 TRATAMENTO DE BIOMASSA ATRAVÉS DO PROCESSO DE TORREFAÇÃO

A torrefação consiste em método de tratamento e condicionamento termoquímico, tratamento este, realizado a uma faixa de temperatura entre 200 a 300 °C. O processo ocorre na ausência de oxigênio sob condições atmosféricas. O processo recebe esse nome a partir da torrefação de grãos de café, apesar de no último caso haver presença de oxigênio e a temperatura de operação ocorrer geralmente em faixas inferiores. Porém, as características mecânicas apresentadas na biomassa após esse tratamento, são semelhantes aos apresentados no café: estrutura quebradiça, hidrofobia, maior relação C/O entre outras. (BOURGEOIS, 1989).

O principal produto da torrefação, é a fase sólida, que possui similaridade ao processo de pirólise, denominada como biomassa torrefeita, devido a que a estrutura química da biomassa é alterada.

Os produtos mais importantes da reação, são o dióxido de carbono, monóxido de carbono, água, ácido acético e metanol (BOURGEOIS, 1989). Todos os produtos não sólidos obtidos, possuem maior quantidade de oxigênio em sua composição, quando comparados com a biomassa antes da realização do tratamento. Dessa forma a relação entre Oxigênio e Carbono da biomassa após a torrefação é menor do que anteriormente, resultando em um maior poder calorífico do produto obtido.

Existe um intenso interesse por a torrefação da madeira recentemente, de forma que pesquisadores no Asian Institute of Technology, em Bangkok, compararam as características relacionadas ao processo de combustão da madeira torrefeita após uma duração entre 2 e 3 horas. Perceberam que a madeira torrefeita, produz uma menor quantidade de fumaça que a madeira que não passou pelo tratamento. Outros estudos também foram realizados, para determinar a melhor forma de se utilizar o processo de torrefação, conforme iremos discutir posteriormente nas próximas seções (ARCATE J.R, 2002).

A biomassa originária das plantas pode ser definida também como lignocelulósica, agrupando as três principais estruturas poliméricas das plantas a base de açúcar: celulose, hemicelulose e lignina. Essas são as três estruturas consideradas quando se deseja estudar a decomposição da biomassa lenhosa e herbácea. E suas funções são definidas como:

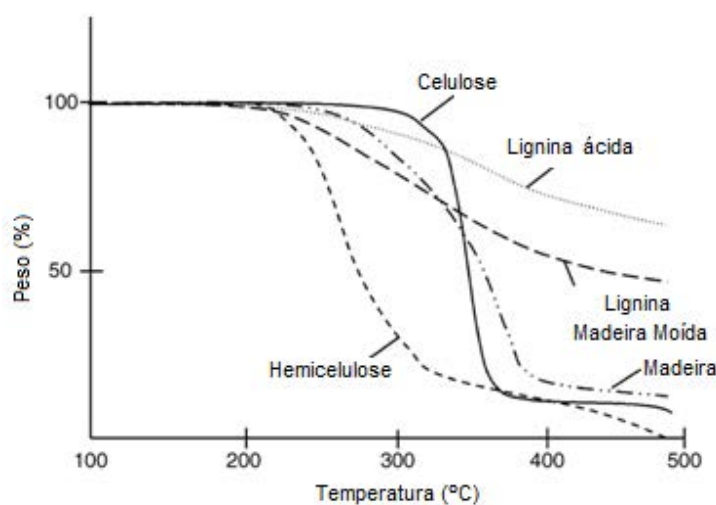
Lignina: Conferir impermeabilidade, resistência mecânica e rigidez.

Celulose: Função estrutura, garantindo firmeza e rigidez.

Hemicelulose: Confere elasticidade.

Dentre essas três estruturas avaliadas durante a decomposição térmica do material, a celulose costuma receber maior atenção no estudo do assunto, pelo fato de sua fração na estrutura ser grande. Portanto, para avaliar o processo de pirólise, é muito importante considerar a decomposição de celulose. Contudo, conforme podemos analisar na Figura 10, ela não o componente de maior relevância na faixa de temperatura em que o processo de torrefação ocorre (entre 200 e 300°C). Durante o processo de torrefação, os componentes que mais impactam a perda de massa por decomposição, são a hemicelulose e lignina (DI BLASI E LANZETTA, 1997).

Figura 10 - Decomposição dos constituintes da madeira em função da temperatura



Fonte: Basu (2010).

A hemicelulose que é a base de xilano, tem seu pico de decomposição na faixa de 250 °C. A lignina, como podemos observar possui uma taxa de decomposição menor, mas que demonstra um aumento percentual para temperaturas acima de 200 °C (DI BLASI E LANZETTA, 1997).

Podem ser separadas em dois passos no seu mecanismo de decomposição. As reações iniciais ocorrem abaixo da temperatura de 205 °C, caracterizando o primeiro passo, são as reações de despolimerização, fazendo com que as moléculas de açúcar sejam alteradas e

reestruturadas. A decomposição destes açúcares a temperaturas de quebra mais elevadas, acarreta a formação de carbonatos, CO₂, água e CO (SÁNCHEZ, 2001).

Até a temperatura de 250 °C a decomposição térmica da celulose, não implica numa perda de massa do material tão significativa e, portanto, o fenômeno mais importante dentro desse intervalo é a despolimerização. A partir dessa temperatura, a decomposição da celulose passa a ter importância, visto que ocorre a formação de diversos gases permanentes, líquidos condensáveis e carvão (PIMCHUAI; DUTTA A; BASU, 2010).

A lignina possui uma degradação térmica relevante em ampla faixa de temperatura. A temperaturas inferiores a 200 °C é comum observar uma baixa perda de peso. Enquanto a formação de componentes voláteis e carvão ocorrem numa faixa de temperatura entre 240 a 600 °C (PIMCHUAI; DUTTA A; BASU, 2010).

Na seção seguinte, iremos a analisar o cenário mundial das tecnologias de torrefação, bem como detalhes do funcionamento de alguma dessas plantas.

3.2 TECNOLOGIAS DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA, ESTADO ATUAL.

Um desafio constante para os criadores de plantas de torrefação de biomassa, é a possibilidade e disponibilidade de tecnologias que reduzam o tempo de processamento, bem como menores requerimentos energéticos no funcionamento e custos para produção da biomassa torrefeita a níveis aceitáveis.

O processo de torrefação se estabelece no final da década de 1980, onde na época o Asian Institute of Technology, Bangkok, Tailândia (ARCATE J.R, 2002), pesquisou a melhoria do estado da madeira e briquetes por emprego desse processo. Outra pesquisa, também foi realizada no Brasil, pelo Grupo Combustíveis Alternativos (GCA) na Universidade Estadual de Campinas, criando um reator também capaz de realizar esse tratamento de madeiras e briquetes. Esses estudos, forneceram novas informações sobre a qualidade obtida no material, mediante o acondicionamento por meio da torrefação (ARCATE J.R, 2002). A partir da Figura 11 pode-se observar a instalação do reator do Grupo Combustíveis Alternativos.

Figura 11 - Sistema de torrefação de biomassa do Grupo Combustíveis Alternativos

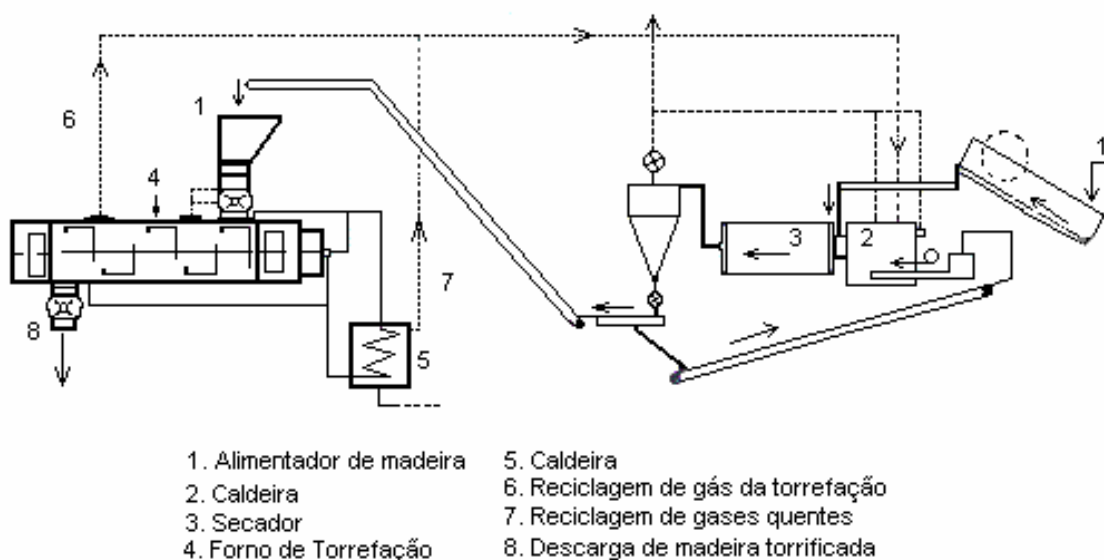


Fonte: Felfli et al. (2005).

A ECN, Centro de Energia dos Países Baixos, realizou longas pesquisas a respeito do assunto, projetando um excelente processo integrado, e possibilitando uma melhor análise dos impactos da torrefação de biomassa empregada na gaseificação de fluxo de arraste (SCHWOB. Y, 1982). Foi desenvolvido um processo denominado TOP (*torrefaction and pelletisation*) que consiste na torrefação e peletização, visando inserir os pellets resultantes desse processo para a indústria energética (BERGMAN P.C.A, 2005). A Planta ECN TOP, atualmente é a única planta que opera comercialmente no mundo.

A Planta PECHINEY, foi inaugurada nos anos 80 na França. A fábrica operou durante alguns anos, e junto de sua subsidiária Le Bois Torrefie du Lot, tinha o intuito de produzir madeira torrefeita, utilizados na fabricação de aço de silício (BERGMAN P.C.A, 2005). Na Figura 12, é possível visualizar o esquema da planta desenvolvida na França.

Figura 12 - Planta de torrefação da PECHINEY Eletrometalurgia

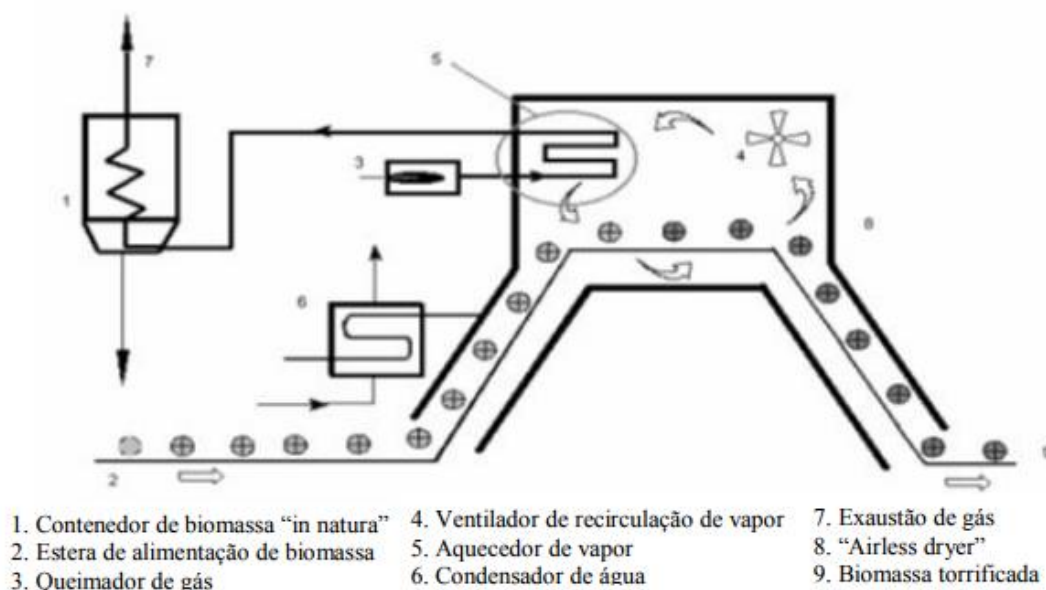


Fonte: Girard; Shah (2005).

A empresa americana Integro Earth Fuels Inc, tem o intuito de inaugurar uma planta de torrefação de biomassas em Roxboro, Carolina do Norte. Com um valor estimado em US\$ 12 milhões, a usina terá capacidade de produzir aproximadamente 84000 toneladas de biomassa torrefeita. Empresas como Econcern, ECN e Chemfo, também têm o intuito de construir novas usinas de torrefação de biomassa em escala comercial.

No Reino Unido, ainda, foi desenvolvida outra tecnologia para o processo de torrefação, denominada, por secagem sem ar (Airless Drying) (BERGMAN P.C.A, 2005), que basicamente usa vapor superaquecida na pressão atmosférica para a secagem e torrefação da madeira por aquecimento indireto. Apesar disso o processo ainda não se encontra comercialmente disponível. Ao analisar a Figura 13 podemos observar o processo de torrefação Airless Drying.

Figura 13 - Sistema de torrefação de biomassa “Airless Drying”



Fonte: Arcate (2002).

A seguir, iremos analisar maiores detalhes das principais tecnologias do processo de torrefação.

3.2.1 A Tecnologia de Torrefação PECHINEY

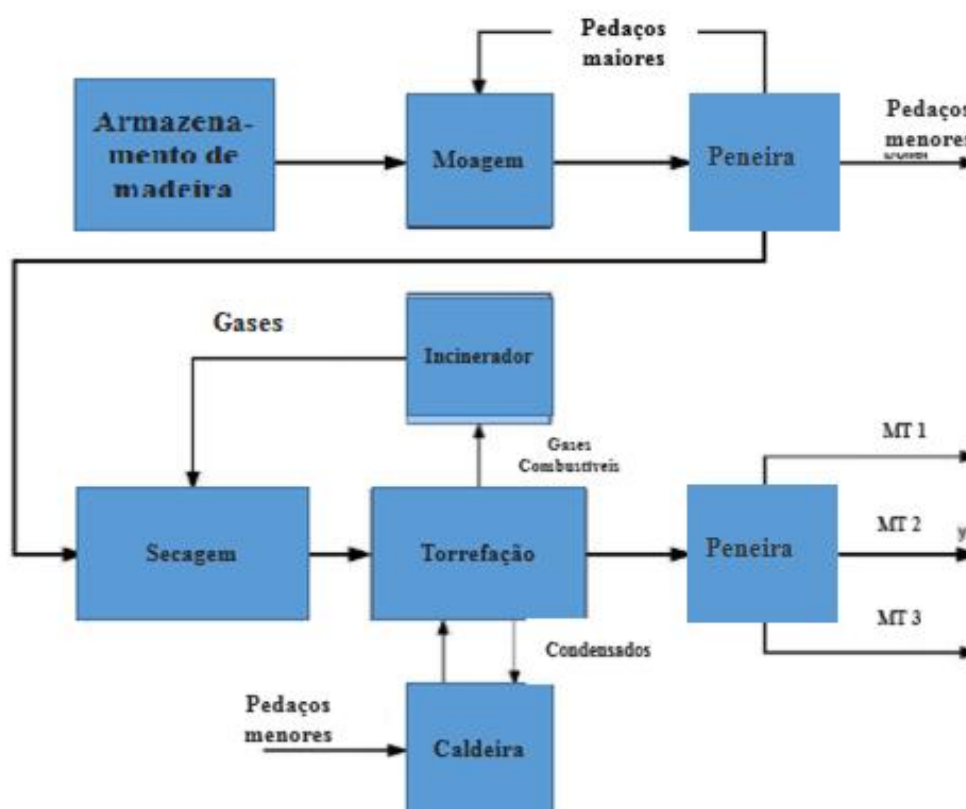
Em torno de 1980, a empresa PECHINEY instituiu a primeira unidade para demonstração do processo de torrefação para a madeira, com uma capacidade aproximada de 12000 t/ano (GIRARD P, SHAH N, 2005).

O processo aplicado em PECHINEY, consiste principalmente em um triturador onde é realizada a moagem da biomassa, um forno onde é realizada a secagem do material e um reator de torrefação. A madeira recebida é cortada em comprimentos e espessuras adequadas no processo de moagem. Os pedaços que estão com dimensões maiores do que desejadas são removidos do processo e enviados para a reciclagem, retornando novamente para o processo de moagem, enquanto os pedaços que estão com dimensões menores do que as adequadas irão para a caldeira a serem queimados e fornecerão posteriormente o calor necessário para o processo de torrefação (BERGMAN P.C.A, 2005).

O material que sofreu redução de dimensões de forma adequada, segue para o processo de secagem, sendo transportado até um forno de túnel que irá reduzir a umidade do material

até aproximadamente 10%. Após a secagem, a biomassa passa para o reator de torrefação que produzem os gases combustíveis que serão incinerados e posteriormente empregados no processo de secagem e os condensados produzidos são queimados na caldeira junto com as partículas com dimensões menores. Na Figura 14, observa-se um esquema com o processo da tecnologia de torrefação PECHINEY. A temperatura no final do reator então é reduzida (BERGMAN P.C.A, 2005). Esse reator apresentou alguns problemas quando empregado em grandes escalas, pois sua área de troca de calor não é tão eficiente. Ao fazer a torrefação da biomassa com teores iniciais de umidade mais elevados, observa-se um menor rendimento do reator. Igualmente são reportadas as perdas de matéria prima durante o processo de moagem, e consequentemente a diminuição da eficiência do processo (BERGMAN P.C.A, 2005).

Figura 14 - Esquema para processo de torrefação PECHINEY



Fonte: Bergman (2005).

3.2.2 Tecnologia de Torrefação ECN

O processo desenvolvido nos laboratórios ECN, consiste no aquecimento direto da

biomassa durante a torrefação, utilizando o gás em alta temperatura reciclado. O gás oriundo do processo de torrefação é pressurizado e aquecido antes de entrar no reator novamente. O calor necessário para que o processo de secagem e torrefação ocorram, é produzido em parte pela combustão do gás liberado na torrefação e também por um combustível auxiliar. Dessa forma, podemos notar que a energia proporcionada pelo gás da torrefação desempenha um papel relevante, para suprimento das demandas energéticas relacionadas ao secador e ao reator (BERGMAN, P. C. A, 2005).

A partir do momento que a energia fornecida pelo gás de torrefação é igual a demanda energética do secador e reator, o sistema passa a operar. Quando essa energia proveniente não é o suficiente para suprir esses casos, energia elétrica necessita ser empregada no sistema (BERGMAN, P. C. A, 2005).

O Grau de umidade apresentado pelo material possui grande importância, afim de se determinar a quantidade de calor que necessita ser empregada no processo. A relação entre o grau de umidade apresentado pela biomassa e o rendimento energético caracterizado na tecnologia de torrefação da ECN, é definida de forma que quanto maior a umidade apresentada pela matéria prima, menor será o rendimento energético que possibilitará o processo de ocorrer sem o emprego de energia elétrica (BERGMAN P. C. A, 2005).

A disponibilidade energética apresentada pelos gases oriundos da torrefação está diretamente relacionada ao rendimento sólido e energético ocorridos no processo de torrefação. De forma indireta, quando a torrefação ocorre em condições diferentes produzindo menor rendimento de energia, ocorrerá excesso de energia presente nos gases da torrefação. O contrário também ocorre, a partir do momento que a energia do processo é maior do que em condições otimizadas, a energia produzida pelos gases, não serão suficientes para suprir as demandas energéticas no reator e no secador. Analisando a Figura 15, pode se compreender de forma mais facilitada como o processo ocorre. O processo de torrefação da tecnologia da ECN, consiste basicamente em um secador, reator de torrefação, trocador de calor, dispositivo de combustão e refrigeração do material (BERGMAN P. C. A, 2005).

combustível pulverizado. Portanto, os pellets podem ser utilizados em tecnologias já existentes relacionadas com o carvão, facilitando sua aplicação para a obtenção de energia, diferentemente de biomassas com maiores tamanhos de partícula (BERGMAN P.C.A, 2005).

Dentre os inconvenientes dos pellets, podemos citar: os elevados custos de produção, elevados custos relacionados com logística nas estações de energia (os pellets são vulneráveis à água), e nem todas as matérias podem aceitar esse tipo de adequação.

O processo de peletização e torrefação pode ser definido como complementar visto que considera os prós e contras de ambos os processos, quando aplicados separadamente. A implementação da torrefação dentro do processo de peletização oferece soluções para problemas como durabilidade e degradação biológica do material. Além disso, a torrefação pode ser aplicada a uma vasta variedade de biomassa, de modo que a diversificação de matéria prima para o processo de biopellets possa ser ampliada. Por outro lado, a implementação da pelletização, oferece também soluções para a matéria prima apenas torrefada, como a melhoria da densidade energética volumétrica e a diminuição de formação de poeira (REED. T, BRYANT. B, 1978).

Os efeitos de sinergia obtidas pela aplicação dessa tecnologia, foram analisados previamente por Reed e Bryant (REED. T, BRYANT. B, 1978). Foram realizadas pesquisas de torrefação e densificação simultâneas a uma temperatura pré definida, e foi constatado que o processo de densificação energética foi aumentado. Dessa forma, a pressão de compactação necessária para a densificação poderia ser reduzida pela metade para obter a mesma qualidade de matéria prima, de que seria obtido sob condições típicas de granulação. Além disso, o consumo de energia também seria reduzido pela metade, enquanto o poder calorífico do material aumentaria consideravelmente. O efeito da aplicação simultânea desses métodos, proporciona um aumento da densidade energética da biomassa de palha, sementes de azeitona e resíduos de madeira (KOUKIOS, E. G., 1993). Fora isso, ainda observou uma possível desvolatilização provavelmente causada pelas baixas temperaturas aplicadas. Atualmente existem estudos no Japão, para aplicação do processo, para possibilitar uma redução de volume para transporte, visto que os recursos energéticos de biomassa, localizam-se longe da área urbana (HONJO, T.; FUCHIHATA, M.; IDA, T.; SANO, H., 2002).

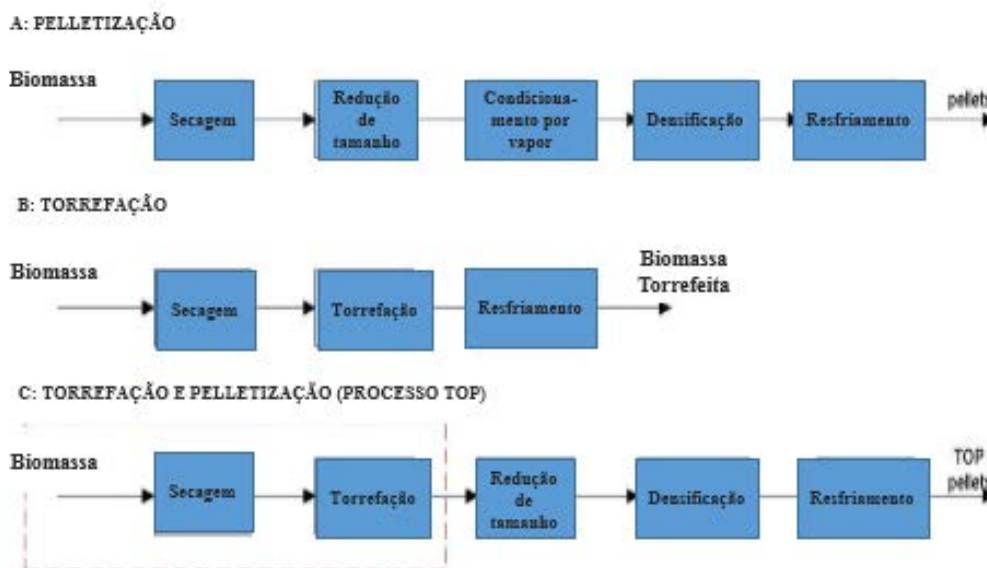
Foi então que a ECN introduziu um processo alternativo para a produção de biopellets, em uma matriz de matéria prima mais diversificada, afim de atender a demanda energética com custos mais baixos envolvidos nos processos.

O processo baseia-se na torrefação e granulação e é denominado (Processo TOP), para a produção de pellets “TOP”. Esse processo garante as vantagens presentes tanto na torrefação quanto na peletização, proporcionando uma ótima qualidade de combustível.

As principais vantagens do emprego deste processo, é um elevado valor calorífico, uma natureza hidrofóbica, a boa moagem através da torrefação, e alta densidade energética obtida pela granulação. Além da qualidade do produto ser consideravelmente evoluída, os efeitos relacionado a produção do biocombustível também é melhorada, quando os processos são realizados em sinergia. Apesar de adicionar custos adicionais pelo emprego da tecnologia de torrefação e peletização, os custos operacionais e de investimento das operações são diminuídos. Estudos iniciais realizados em cima da implementação desse processo, revelou que o uso da tecnologia não necessariamente aumenta o custo produtivo, enquanto a qualidade do produto obtida, barateia o processo relacionados com transporte e processamento (BERGMAN P. C. A., 2005).

O conceito de peletização de biomassa, basicamente consiste em secagem, redução de tamanho antes da densificação. Após a densificação, os biopellets quentes são resfriados. O condicionamento da biomassa através do vapor é também aplicado a fim de se melhorar o processo de densificação através do amolecimento das fibras. Por outro lado, a torrefação consiste na secagem previa da biomassa, torrefação e resfriamento do material. Portanto, podemos observar que ambos os processos possuem boa proximidade em suas estruturas de execução. Na Figura 16, podemos observar o esquema de processo básico para a torrefação, para a granulação e ambos os processos combinados.

Figura 16 - Representação da tecnologia de Torrefação e Pelletização



Fonte: Bergman (2005).

O processo de torrefação é introduzido como uma unidade funcional após o processo de secagem e antes da redução de tamanho. Diferentemente das pesquisas realizadas por Reed e Koukios, o processo TOP não assume os processos de torrefação e densificação em uma única etapa. O principal objetivo em se realizar os procedimentos em etapas separadas é evitar a desvolatilização da biomassa durante o processo de pelletização. Além de se acreditar ser mais difícil estipular o calor térmico necessário para que os dois processos ocorram de forma simultânea.

Além dos efeitos sinérgicos relacionados a qualidade do combustível no momento em que empregamos a torrefação e pelletização de forma combinada, o nível das operações da unidade envolvendo a pelletização, também é beneficiado. O armazenamento dos pellets produzido se torna mais simples, visto que a degradação biológica e absorção de água são minimizadas.

3.3 PROPRIEDADES DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR TORREFEITO

Nesta seção, iremos apresentar os benefícios obtidos pelo emprego de a torrefação como modo de condicionamento da biomassa. Em seguida, iremos também estabelecer comparativos, das propriedades obtidas pela torrefação e pelo processo de torrefação

combinado com a peletização,

Após finalizado o processo de torrefação, analisando o material obtido com o tratamento, pode-se constatar um aumento percentual da quantidade de carbono e diminuição percentual das quantidades de oxigênio e hidrogênio. A quantidade relacionada ao nitrogênio não sofreu alterações significativas.

A temperatura e tempo no processo de torrefação são os principais parâmetros que influenciam nas características resultantes. Na análise realizada, as propriedades da biomassa empregada são melhoradas significativamente em temperaturas mais altas (entre 523 a 573K). Na Tabela 5, podemos analisar a variação das propriedades do bagaço de cana-de-açúcar com um tratamento a 523K, após diferentes intervalos de reação (BASU, 2010).

Tabela 5 - Mudança nas propriedades do bagaço de cana após torrefação a 523 K.

Propriedades	Tempo de Torrefação (min)		
	15	30	45
Rendimento em Massa (%)	69	68,33	62
Eficiência Energética (%)	88,86	91,06	83,23
Densidade energética (% <i>energia obtida / % massa obtida</i>)	1,29	1,33	1,34
Energia requerida (<i>MJ/kg bagaço torrefeito</i>)	2,34	2,58	2,99
Poder Calorífico Superior (PCS) (<i>MJ/kg bagaço torrefeito</i>)	19,88	20,57	20,72
Aumento do PCS (%)	22,35	24,96	25,51
PCS (<i>MJ/kg matéria-prima</i>)	15,44	15,44	15,44
Energia líquida (<i>MJ/kg bagaço torrefeito</i>)	17,54	17,99	17,73

Fonte: Basu (2010).

A melhor evolução de bagaço de cana-de-açúcar após um processo de torrefação de 1,5 horas foi relatada por Pimchuai; Duta e Basu (2010), obtendo um resultado de densidade energética 1,66 vezes mais elevada, a uma temperatura de reação de 573 K. Em relação a matéria prima, a massa e o rendimento energético apresentaram 42 e 69,8%, respectivamente, significando uma necessidade de 13% menos energia do produto sólido para o processo ser executado.

Outro benefício obtido após o tratamento de torrefação do bagaço de cana, é o fato da biomassa se tornar hidrofóbica, evitando a degradação natural apresentada pelo material antes do tratamento, por apresentar elevada umidade, açúcar e sujeira. Dessa forma é possível estocar o material de forma mais eficaz (MACHIN, 2015).

As principais vantagens do processo de torrefação do bagaço de cana-de-açúcar, podem

ser destacados a seguir (MACHIN, 2015):

1. A degradação natural do bagaço é prevenida pela diminuição gradativa da umidade, representando ao material um caráter hidrofóbico. Ocorre a eliminação de odores, e possibilidade de auto-combustão, garantindo ao material uma estocagem mais segura e eficaz.
2. O material resultante apresenta menos dimensões quando comparadas com o bagaço inicial, além disso a biomassa se tornará menos resistente devido a remoção parcial ou total da Hemicelulose, e o processo de moagem será necessária uma menor quantidade de energia para ser realizada.
3. Conforme mostrado anteriormente, há um aumento da densidade energética do bagaço pela diminuição significativa da massa da biomassa após o tratamento. Benefício esse responsável por diminuição de custos relacionados com logística de transporte e estocagem.
4. Após o tratamento, o bagaço poderá ser empregado como fonte de combustíveis em reatores próprios para carvão, o que torna possível a gaseificação do material empregando tecnologias já dominadas e conhecidas previamente.

Foram realizados também, estudos para comparar as características obtidas pelo processo de torrefação combinadas com a peletização.

As propriedades obtidas após o processo TOP podem ser analisadas na Tabela 6, madeira convencional, pellets de madeira e biomassa torrefeita (BERGMAN P.C.A, 2005).

Conforme discutido na seção anterior, ao analisar a tabela podemos constatar uma sinergia entre os processos, de forma que as propriedades combustíveis da biomassa torrefeita, são muitas vezes evoluídas pelo processo de peletização, tornando os métodos de tratamento complementares. Podemos observar esse fato, analisando natureza hidrofóbica do material, formação de poeira, que são complicadores quando apenas um dos processos são empregados, mas quando realizado o processo TOP, esses problemas são solucionados. Indicamos por esses motivos, o emprego dessa tecnologia, para nosso caso, que é o do tratamento para o bagaço de cana.

Tabela 6 - Propriedades da madeira, biomassa torrefeita, pellets e TOP pellets.

Propriedades	Unidade	Madeira	Biomassa torrefeita	Pellets		TOP pellets	
				Baixo	Alto	Baixo	Alto
Teor de umidade	% wt.	35%	3%	10%	7%	5%	1%
Poder calorífico	MJ/kg	10,5	19,9	15,6	16,2	19,9	21,6
Biomassa Seca	MJ/kg	17,7	20,4	17,7	17,7	20,4	22,7
Densidade Mássica	kg/m3	550	230	500	650	750	850
Densidade Energética	GJ/m3	5,8	4,6	7,8	10,5	14,9	18,4
Dureza do pellet		-	-	-		Bom	Muito Bom
Formação de poeira		Moderado	Alto	Limitado		Limitado	
Natureza higroscópica		Absorve água	Hidrofóbico	Absorve água		Hidrofóbico	
Degradação biológica		Possível	Impossível	Possível		Impossível	
Influências sazonais (Perceptível para o usuário final)		Alto	Ruim	Moderado		Ruim	
Características de manipulação		Normal	Normal	Bom		Bom	

Fonte: Bergman, P. C. A. (2005).

CAPITULO 4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO NO BALANÇO ENERGETICO DA INTRODUÇÃO DA TORREFAÇÃO ASSOCIADA À TECNOLOGIA BIG-GTCC NUMA USINA SUCROALCOOLEIRA

4.1 REVISÃO DOS CASOS PROPOSTOS EM ESTUDOS ANTERIORES

Iremos nesse capítulo, realizar uma revisão dos resultados obtidos em um estudo anterior, onde foi analisada a incorporação de sistemas de gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro do Brasil, utilizando a tecnologia BIG-GTCC (MACHIN, 2015).

Também, conforme exposto, iremos a avaliar a torrefação do bagaço, para melhorar as propriedades energéticas dessa biomassa e suas características físicas de moagem, já introduzidas conceitualmente nas seções anteriores, gerando uma significativa melhoria em questões de transporte, e logística em geral (BASU, 2010). Com essas melhorias proporcionadas pelo bagaço de cana torrefeito, será possível empregar a gaseificação de forma mais eficiente, utilizando tecnologias bem desenvolvidas disponíveis comercialmente, que em geral são desenhadas para a utilização do carvão mineral como combustível.

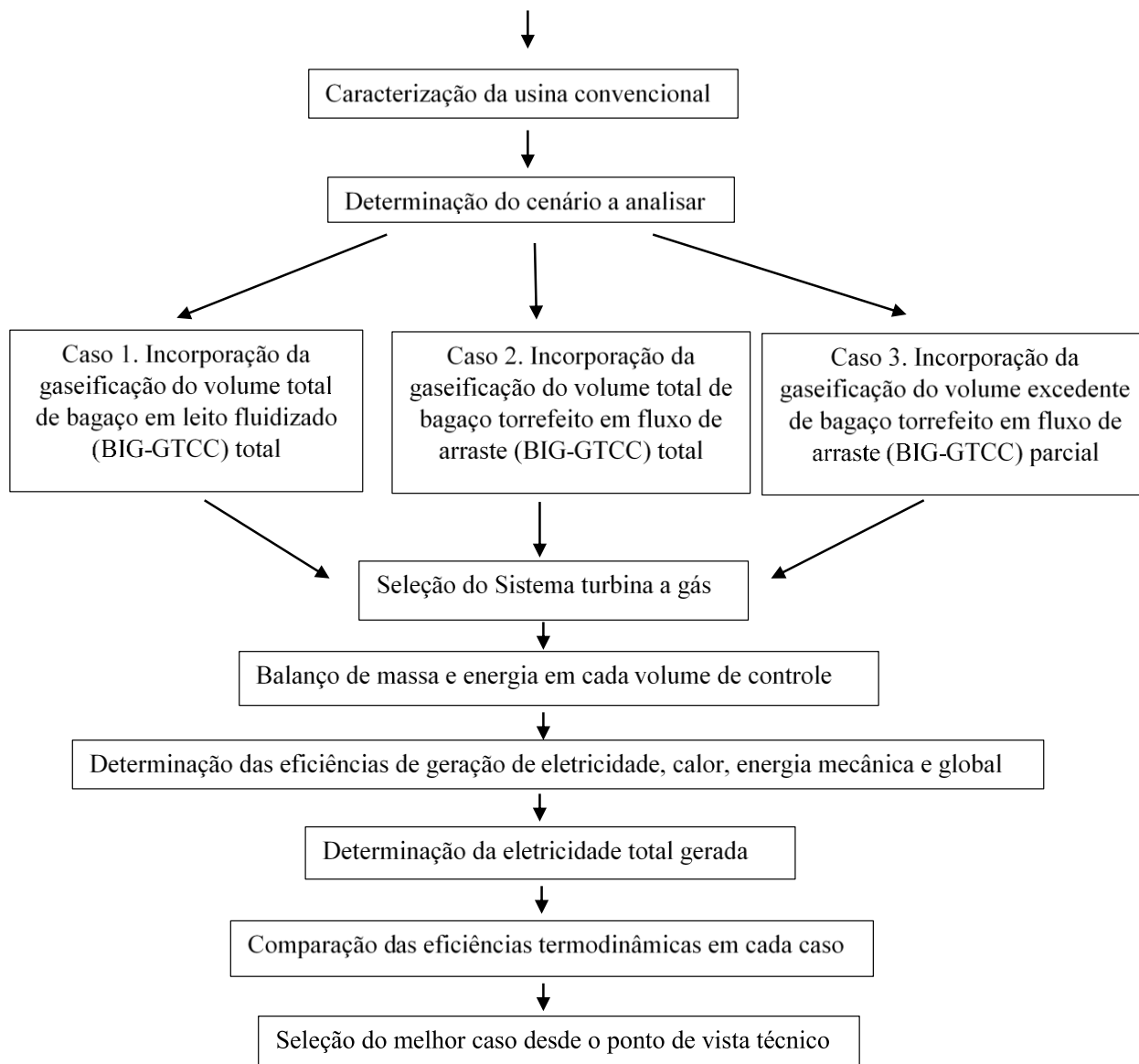
Na Figura 17, está esquematizada a metodologia empregada na análise térmica da incorporação do sistema BIG-GTCC no setor sucroalcooleiro considerando três configurações possíveis.

Estudos têm demonstrado um bom potencial para o emprego de um ciclo integrado de gaseificação de biomassa juntamente com um ciclo combinado de turbina a gás(BIG-GTCC), (LARSON , 2001, REED; DAS, 1998; FILIPPIS, et al. 2008; E4TECH, 2009; KUNTAL; SUDIPTA, 2014), ainda que os benefícios obtidos por essa tecnologia estejam em desenvolvimento e pesquisa.

O BIG-GTCC, é uma combinação de duas principais tecnologias: o ciclo combinado de turbina a gás e gaseificação de biomassa. Nesse tipo de processo, é produzido um gás limpo que alimenta a turbina a gás, sendo a utilização do gaseificador a tecnologia adequada para transformação do bagaço de cana.

No setor sucroalcooleiro, a gaseificação da biomassa (bagaço de cana) é realizada de duas maneiras, ou de forma total, ou de forma parcial. Na definição de modo parcial, o sistema de cogeração existente na usina é mantido, e a gaseificação é empregada somente com a parte de biomassa excedente do processo.

Figura 17 - Metodologia empregada na análise térmica da incorporação do sistema BIG-GTCC



Fonte: Machin (2015).

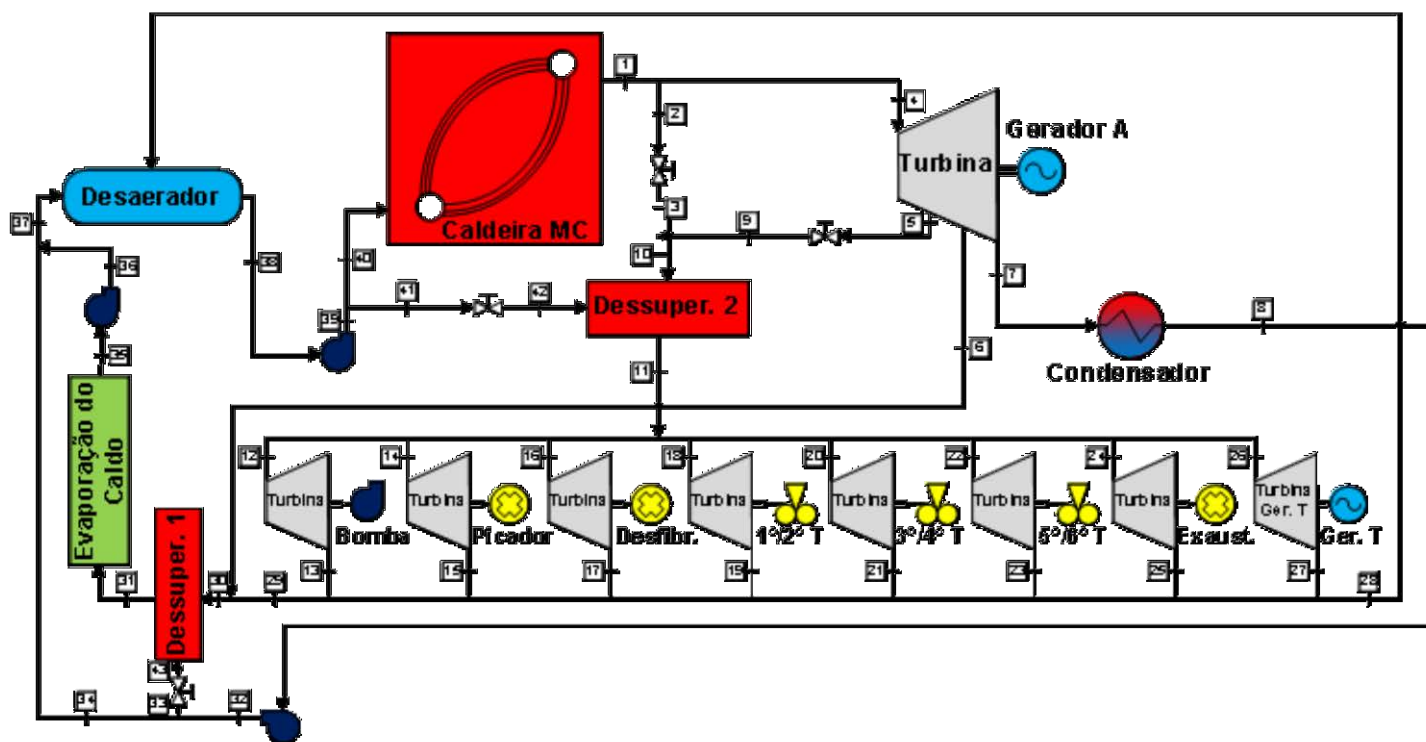
No caso da implementação total, o sistema convencional de cogeração é completamente substituído pelo uso do sistema BIG-GTCC. Para o emprego do processo BIG-GTCC, seja de forma parcial ou total, é necessário manter os requerimentos de vapor da planta de cogeração, isto é, todos os parâmetros de saída da caldeira devem ser mantidos, além disso, a modificação da configuração da planta, deverá garantir a demanda térmica requerida no processo. Ainda nesta etapa do trabalho, iremos determinar os valores das potências, eficiências de geração elétrica e eficiências da incorporação do sistema BIG-GTCC.

As usinas de açúcar e álcool convencionais, empregam o bagaço de cana com elevado

teor de umidade, além a palha de cana como os combustíveis de alimentação nas caldeiras de baixa pressão para gerar vapor e energia, utilizando uma turbina a vapor de extração e condensação com a intenção de fornecer calor a planta, além de energia mecânica e eletricidade. Em um ciclo Rankine, o vapor é o fluido de trabalho utilizado, sendo este gerado a partir da água em seu estado líquido. O vapor então, passa pela turbina, e esta energia é transformada em trabalho (energia mecânica) no sistema de geração elétrica. Apesar deste fato, nem toda a parte da energia presente no vapor, é utilizada na geração de energia elétrica, devido a perdas que ocorrem devido ao atrito e à viscosidade. A água de alimentação que é condensada, retorna à caldeira convencional por bombeamento.

Foi analisado a implementação do processo BIG-GTCC em uma usina sucroalcooleira convencional que possui capacidade de processamento equivalente a 276,9 t/h de cana de açúcar na época de colheita. A planta em si, produz cerca de 79 t/h da biomassa, com 50% de umidade, sendo que 70,5 t/h são queimados em uma caldeira, normalmente projetada para gerar uma quantidade de 150 t/h de vapor 6468,0 kPa de pressão e temperatura de 809K. Na Figura 18, pode-se observar o esquema apresentado pela usina convencional.

Figura 18 - Fluxograma da Destilaria Pioneiros na safra 2005/2006



Fonte: Fiomari (2004).

Essa planta tem um turbo gerador com capacidade de geração de eletricidade igual a 40MVA nominalmente com vapor de alta pressão, com uma turbina de vários estágios de extração e condensação.

A Turbina Gerador A produz uma potência elétrica de 19,15 MW, a demanda elétrica para o funcionamento da usina é de 7,60 MW, sendo portanto produzido um valor excedente de 11,55 MW, para essa configuração (FIOMARI, 2004).

Segundo o estudo realizado por Fiomari (2004), as turbinas responsáveis pela alimentação da água da caldeira, do gerador T e do exaustor, não executam operação, apesar de estarem instaladas e poderem eventualmente ser operadas. O ponto 2, equivale a tubulação em que o excedente de vapor da turbina poderá escoar. A pressão desse vapor sofrerá uma diminuição na pressão através de uma válvula para 2156 kPa, que é a pressão especificada para o funcionamento correto das outras turbinas existentes no projeto da planta. O vapor que é extraído no ponto 5, de mesma forma sofrerá diminuição de pressão para escalas similares. Esse fluxo, então passa por um dessuperaquecedor onde a temperatura será diminuída para valores aceitáveis pelas turbinas de simples estágio. O ponto 8, indica a saída do condensador da turbina. O condensado, então passará para o desaerador através de uma bomba, de forma conjunta com o condensado presente no sistema de evaporação do caldo. Depois disso, a água presente no desaerador será bombeada para a caldeira.

Fica indicado na Tabela 7 alguns parâmetros de moagem, produção do bagaço de cana, consumo da caldeira da usina avaliada e moagem (FIOMARI, 2004).

Tabela 7 - Valores referentes a moagem, produção e consumo de bagaço de cana da usina avaliada

Parâmetros	Valores	Unidades
Dias de Safra	215	Dias
Horas efetivas de moagem	4695,6	h
Moagem horária	76,91	kg/s
Fluxo de bagaço na caldeira	19,58	kg/s
Fluxo de bagaço total produzido	21,91	kg/s
Fluxo de bagaço residual	2,33	kg/s
Poder Calorífico Inferior bagaço	7,32	MJ/kg
Temperatura do bagaço	25	°C
Umidade do bagaço	50	%

Fonte: Adaptado de Fiomari (2004).

Os dados referentes as informações termodinâmicos da usina avaliada são apresentados na Tabela 8 a seguir (FIOMARI, 2004).

Tabela 8 - Dados de operação da usina avaliada

Pontos	Fluxo mássico [kg/s]	Pressão [kPa]	Temperatura[°C]	Entalpia Específica [kJ/kg]	Entropia Específica [kJ/kg K]
1	41,67	6.468,0	530,0	3.488,5	6,93
2	8,14	6.468,0	530,0	3.488,5	6,93
3	8,14	2.156,0	510,2	3.488,5	7,42
4	33,53	6.468,0	530,0	3.488,5	6,93
5	10,00	2.650,0	426,0	3.295,1	7,07
6	17,78	245,0	147,2	2.759,3	7,16
7	5,75	8,5	42,7	2.578,2	8,20
8	5,75	8,5	42,6	178,4	0,60
9	10,00	2.156,0	422,7	3.295,1	7,16
10	180,56	2.156,0	462,0	3.381,9	7,28
11	20,33	2.156,0	320,0	3.064,8	6,80
14	4,08	2.156,0	310,0	3.041,6	6,76
15	4,08	245,0	185,0	2.837,3	7,34
16	4,08	2.156,0	310,0	3.041,6	6,76
17	4,08	245,0	185,0	2.837,3	7,34
18	4,17	2.156,0	310,0	3.041,6	6,76
19	4,17	245,0	194,5	2.856,6	7,38
20	4,00	2.156,0	310,0	3.041,6	6,76
21	4,00	245,0	194,5	2.856,6	7,38
22	4,00	2.156,0	310,0	3.041,6	6,76
23	4,00	245,0	194,5	2.856,6	7,38
28	0,83	245,0	190,7	2.848,8	7,36
29	19,50	245,0	190,7	2.848,8	7,36
30	37,28	245,0	169,8	2.806,1	7,27
31	38,33	245,0	135,0	2.733,5	7,10
32	5,75	490,0	42,7	179,3	0,60
33	1,06	490,0	42,7	179,3	0,60
34	4,69	490,0	42,7	179,3	1,30
35	38,33	245,0	100,0	419,2	1,30
36	38,33	490,0	100,1	419,6	1,30
37	43,03	490,0	93,8	393,4	1,23
38	43,86	245,0	105,0	440,3	1,36
39	43,86	8.820,0	106,8	454,1	1,37
40	41,67	8.820,0	106,8	454,1	1,37
41	2,19	8.820,0	106,8	454,1	1,37
42	2,19	2.156,0	107,8	454,1	1,39
43	1,06	245,0	42,8	179,3	0,61

Fonte: Fiomari (2004).

Estes dados que foram expostos na Tabela 8 anterior, serão utilizados como base de formulação para cada uma das sugestões de configurações propostas e avaliadas.

Os três casos analisados, são:

Caso 1: Gaseificação do volume total do bagaço da usina em leito fluidizado borbulhante e substituição da caldeira convencional pelo sistema Gaseificador – Turbina a Gás – Caldeira de Recuperação (BIG-GTCC Total).

Caso 2: Gaseificação do volume total de bagaço da usina em fluxo de arraste e substituição da caldeira convencional pelo sistema Gaseificador – Turbina a Gás – Caldeira de Recuperação (BIG-GTCC Total), com pré-tratamento do bagaço mediante a torrefação.

Caso 3: Gaseificação do excedente de bagaço da usina convencional em fluxo de arraste, considerando a torrefação como processo de pré-tratamento do bagaço (BIG-GTCC “Parcial”).

4.1.1 Caso 1: Gaseificação do volume total do bagaço da usina em leito fluidizado borbulhante e substituição da caldeira convencional pelo sistema gaseificador – turbina a gás – caldeira de recuperação (BIG-GTCC Total)

O Caso 1 de nosso estudo, será estudado o processo de gaseificação no volume total da biomassa empregada (bagaço) na usina em leito fluidizado borbulhante, e a troca da caldeira convencional utilizada por uma tecnologia de gaseificação – turbina a gás e caldeira de recuperação (BIG-GTCC “total”). Será empregada além disso, o processo de secagem, como tecnologia de pré-tratamento do bagaço com umidade elevada.

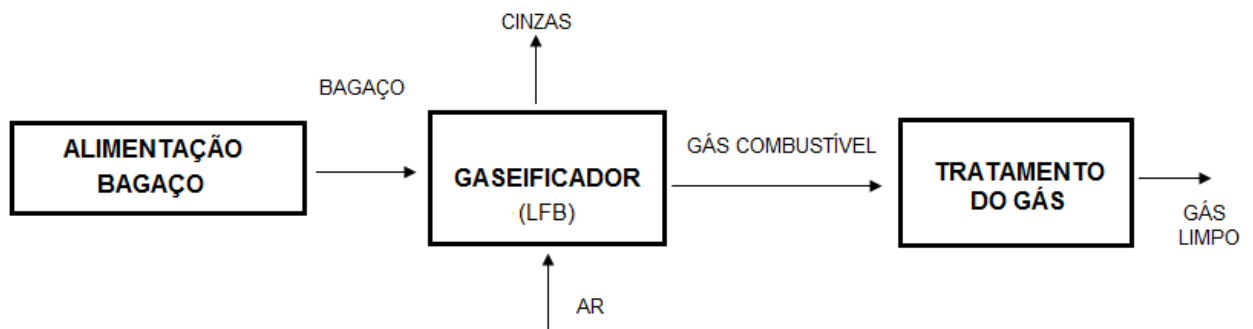
Para que possa ser utilizado o ciclo BIG-GTCC “total” nesta usina, os requisitos para se obter vapor a alta pressão no processo, deverão ser supridos pelo calor originado nos gases de escape da turbina a gás. A Figura 19, ilustra a introdução da tecnologia BIG-GTCC “total” na indústria.

No esquema apresentado na Figura 19, foram mantidos os mesmos parâmetros na saída da caldeira de recuperação da usina convencional, e os valores também foram mantidos conforme reportado na Tabela 8.

Ao contrário da usina convencional, onde todo o bagaço de cana é queimado, neste caso o bagaço será introduzido em um gaseificador, sendo possibilitado através da introdução de um conjunto Gaseificador – Turbina a Gás – Caldeira de Recuperação.

A tecnologia de gaseificação, é formada por um sistema de alimentação para o bagaço de cana, gaseificador em leito fluidizado borbulhante (LFB) e um sistema de limpeza onde será realizado o tratamento do gás, condicionando-o e o tornando limpo. Na Figura 20 podemos analisar o processo descrito anteriormente.

Figura 20 - Tecnologia de gaseificação em Leito Fluidizado Borbulhante.



Fonte: Machin (2015).

Para a realização da análise da planta, os dados considerados para a análise técnica são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados utilizados na análise técnica

Parâmetros	Valores	Unidades
η_{cr}	70	%
R_g	0,29	kJ/kg.k
$\eta_{compressor}$	80	%
η_{tgiso}	89	%
η_{CC}	95	%
ΔP_{CC}	0,05	kPa
ΔP_{cr}	0,05	kPa
η_e	95	%

Fonte: Machin (2015).

O balanço de energia e de massa, pode ser obtido através das Equações (2) e (3):

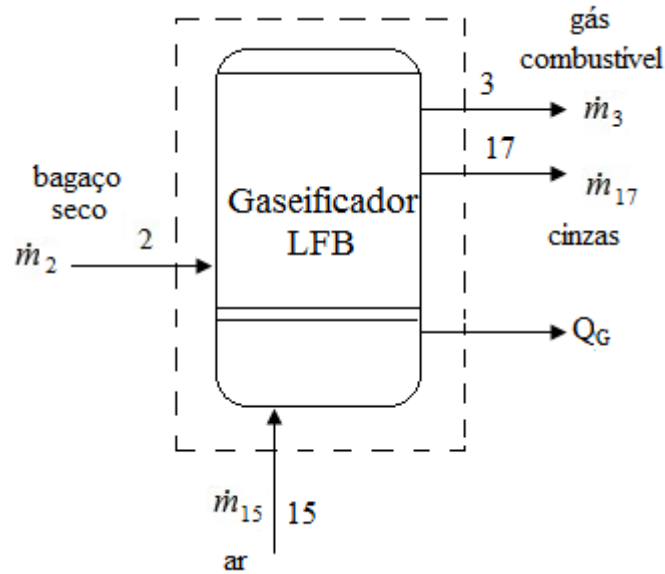
$$\frac{dm_{v.c.}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (2)$$

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g \cdot Z_e \right) - \sum \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + g \cdot Z_s \right) \quad (3)$$

O volume de controle no gaseificador de leito fluidizado borbulhante está indicado na

Figura 21.

Figura 21 - Volume de controle no gaseificador em leito fluidizado borbulhante (LFB)



Fonte: Machin (2015).

A Equação (4), segundo Prins; Ptasiński; Janseen (2003) e Karamarković; Karamarković (2010), demonstra o balanço energético em um gaseificador LFB, empregando ar, vapor ou uma mistura dos dois componentes como agente de gaseificação.

$$\dot{m}_{biomassa} PCI_{biomassa} + \dot{m}_{ar} \Delta h_{ar} + \dot{m}_{H_2O} (h_{fg} + \Delta h_{H_2O}) = \dot{m}_{gás} (\Delta h_g + PCI_g) + \dot{m}_{biomassa} z_c Carvão (\Delta h_{carvão} + PCI_{Carvão}) + \dot{m}_{cinzas} \Delta h_{cinzas} + Q_G \quad (4)$$

Supondo que o ar em condições padrões é o agente gaseificador do processo de gaseificação e que este ocorra no ponto limite de carbono (Carbon Boundary Point), ou seja quando a gaseificação de biomassa ocorre de forma completa, sem a formação de carvão residual, o balanço energético do sistema implementado pode ser definido pela Equação (5).

$$\dot{m}_2 \cdot PCI_{bgs} = \dot{m}_3 (\Delta h_g + PCI_g) + \dot{m}_{cinzas} \Delta h_{cinzas} + Q_G \quad (5)$$

Para se obter a vazão mássica de bagaço de cana ($\dot{m}_2$), foi calculada a potência elétrica desempenhada pela turbina a gás, pela Equação (6).

$$E_{tge} = E_{tg} * \quad (6)$$

Com a Equação 7, determinamos que a potência elétrica para a configuração é de 19,13 MW, admitindo que a eficiência para a geração de energia seja de 95%.

$$E_{tve} = E_{tv} * \quad (7)$$

Com a Equação 8, podemos calcular a potência elétrica total gerada (E_{te} na usina.

$$E_{te} = E_{tve} + E_{tge} \quad (8)$$

A potência fornecida pelo combustível é fornecida pela Equação (9)

$$E_{combGS} = \frac{E_{tge}}{\eta_{tg}} \quad (9)$$

A vazão mássica do gás de síntese ($\dot{m}_3$), é disponibilizada pela Equação (10).

$$\dot{m}_3 = \frac{E_{tge}}{\eta_{tg} \cdot PCI_g} \quad (10)$$

A eficiência média de um sistema de gasificação a frio é de 75% (REED, 1998; LARSON et al., 2001; E4TECH, 2009; WORLEY e YALE, 2012).

Através da Equação 11, pode-se calcular a vazão mássica de bagaço que entra no reator de gaseificação.

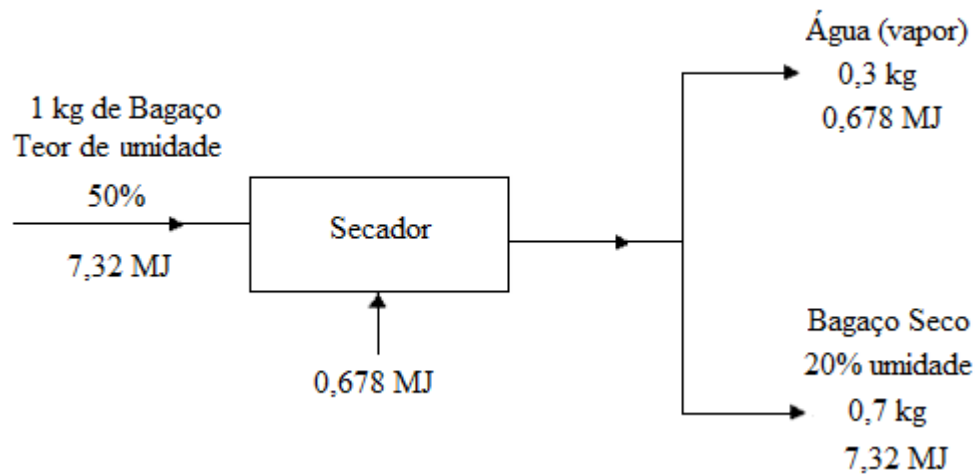
$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_3 \cdot PCI_g}{\eta_{gase} \cdot PCI_{bgs}} \quad (11)$$

Onde, η_{gase} é a eficiência a frio do gaseificador, sendo o ar seu agente de gaseificação, obtida pela Equação 12 :

$$\eta_{gase} = \left(\frac{\dot{m}_3 \cdot PCI_g}{\dot{m}_2 \cdot PCI_{bgs} + \dot{m}_{ar} \cdot h_{ar}} \right) \quad (12)$$

Foi efetuado um balanço energético no secador de bagaço de cana através da Equação 12, para se determinar a quantidade de biomassa necessária para atender a demanda de vapor na usina (PRINS; PTASINSKI; JANSEEN, 2006). A energia necessária para que se ocorra o processo de secagem, é disponibilizada pela exaustão dos gases da caldeira e a queima adicional de bagaço de cana. O processo pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 - Balanço de massa e balanço energético no secador de bagaço de cana de açúcar.



Fonte: Machin (2015).

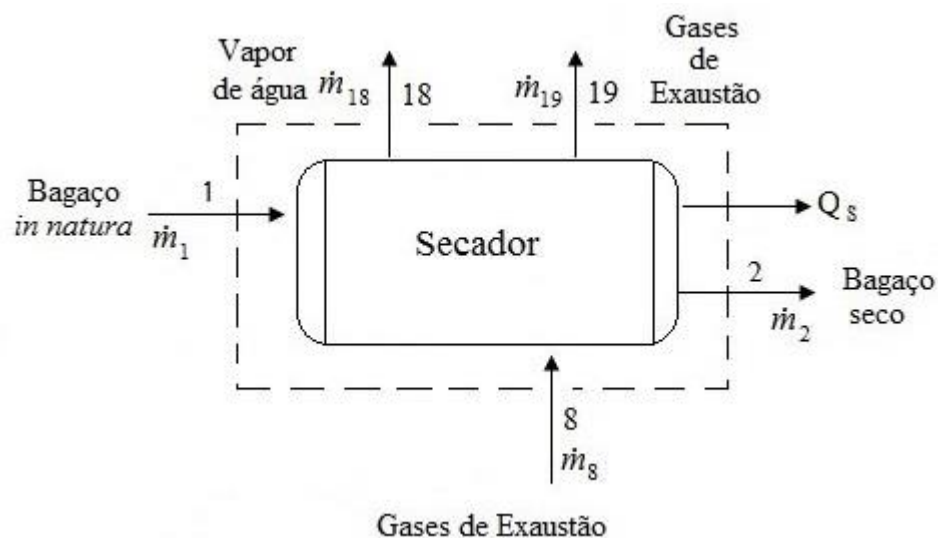
O balanço de energia no secador de bagaço e a energia fornecida pelos gases de exaustão, são calculados pelas Equações 13 e 14 respectivamente.

$$\dot{m}_1 \cdot PCI_{bgu} + Q = \dot{m}_2 \cdot PCI_{bgs} + \dot{m}_{vapor} \cdot h_{vapor} + \dot{m}_2 \cdot Cp_{BS} \cdot \Delta T + Q_s \quad (13)$$

$$Q = \dot{m}_8 \cdot Cp \cdot \Delta T - \dot{m}_{19} \cdot Cp \cdot \Delta T - Q_s \quad (14)$$

O volume de controle no secador de bagaço de cana é observado na Figura 23.

Figura 23 - Volume de controle no secador de bagaço de cana de açúcar.



Fonte: Machin (2015).

A vazão da biomassa que é requisitada pela usina, considerando o PCI do bagaço de 7320,0 kJ/kg e umidade em 50% (MILES et al. 1995), pode ser calculada pela Equação 15.

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_2 \cdot \text{PCI}_{\text{bgs}} + \dot{m}_{\text{vapor}} \cdot h_{\text{vapor}} + \dot{m}_2 \cdot C_{p\text{BS}} \cdot \Delta T - Q_{\text{GE}}}{\text{PCI}_{\text{bgu}}} \quad (15)$$

Sendo determinado a vazão total de bagaço de cana exigido pela a usina com a incorporação do ciclo BIG-GTCC e conhecendo a vazão de bagaço disponibilizada pela configuração convencional da usina, segundo Fiomari, (2004), pode-se determinar que essa vazão não o suficiente para atender a demanda de vapor da planta de cogeração. A vazão mássica de bagaço que deve ser comprado ($\dot{m}_{\text{bgc}}$), para suprir essa demanda é calculada pela Equação 16.

$$\dot{m}_{\text{bgc}} = \dot{m}_1 - \dot{m}_{\text{bg}} \quad (16)$$

A Equação 17, nos fornece-se o cálculo da eficiência para a geração de energia elétrica, levando em conta as potências elétrica originadas na usina e o consumo da bomba.

$$\eta_{\text{ge}} = \frac{E_{\text{tge}} + E_{\text{tve}} - W_b}{E_{\text{comb}}} \quad (17)$$

Por outro lado, a eficiência global da usina pode ser calculada através da Equação 18.

$$\eta_{\text{gl}} = \frac{E_{\text{tge}} + E_{\text{tve}} + W_{\text{mec}} + Q_{\text{proc}} - W_b}{E_{\text{comb}}} \quad (18)$$

Os resultados para o ciclo combinado são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados obtidos no BIG-GTCC

E_{tve} [kW]	E_{tge} [kW]	E_{te} [kW]	$\dot{m}_3$ [kg/s]	$\dot{m}_2$ [kg/s]	$\dot{m}_1$ [kg/s]	$\dot{m}_{\text{bgc}}$ [kg/s]
19.127,0	167.229,0	186.356,0	100,93	56,39	80,58	61,30

Fonte: Machin (2015).

Utilizando a turbina a gás selecionada (Siemens Energy modelo SGT6-5000F), para se satisfazer a demanda de vapor da usina, é necessário um dispositivo de gaseificação que consiga processar em torno de 600 MW(térmicos), visto que a maioria dos sistemas de gaseificação em leito fluidizado disponíveis comercialmente, possuem eficiência de gás em torno de 65% a 75% (REED, 1998; LARSON, 2001; E4TECH, 2009; WORLEY; YALE, 2012).

Os dados referentes ao funcionamento da usina escolhida após a introdução do ciclo BIG-GTCC estão disponíveis para análise na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados da análise energética para o Caso 1.

Pontos	Fluxo Mássico[kg/s]	Temperatura[K]	Pressão[kPa]	Fluxo de Energia[MW]
1	80,58	298	101,3	589,9
2	56,39	298	101,3	589,9
3	116,2	298	1931	442,4
4	352,45	298	101,3	-
5	352,45	791	1.931,0	-
6	468,65	1.563,0	1.834,0	442,4
7	468,65	860	107	274,94
8	468,65	544	101,3	132,58
9	41,67	803	6.468,0	145,4
10	33,53	803	6.468,0	116,97
11	5,75	315	8,5	14,82
12	17,78	420,2	245,0	49,06
13	10,0	699	2.650,0	32,95
14	41,67	379,8	8.820,0	18,92
15	61,48	298	101,3	-
16	-	-	-	167,23
17	1,69	298	101,3	0
18	24,19	373	101,3	64,73
19	468,65	442,6	101,3	77,95
20	-	-	-	0,80

Fonte: Machin (2015).

Através da Tabela 12 podemos observar os resultados referentes as eficiências de geração de energia elétrica, energia mecânica e global com a implementação do sistema BIG-GTCC do volume total de bagaço de cana de açúcar da usina.

Tabela 12 - Eficiências de geração de energia elétrica, calor, energia mecânica, global e a potência total gerada para o Caso 1

Tecnologia	η_{ge} [%]	η_{Qpr} [%]	η_{emec} [%]	η_{gl} [%]	E_{te} [MW]
Convencional	12,9	61,9	2,73	77,5	19,13
BIG-GTCC*	41,9	20,1	0,89	62,9	186,36
BIG-GTCC**	27,1	12,9	0,57	40,6	186,36

* Considerando E_{comb} do gás de síntese. ** Considerando o E_{comb} do bagaço.

Fonte: Machin (2015).

A partir da análise dos resultados, podemos observar que a eficiência global do sistema acaba diminuindo; no entanto, em termos de geração de energia elétrica, analisamos que é vantajoso quando comparado ao sistema da usina convencional. O principal obstáculo relacionado a implementação do sistema BIG-GTCC “total”, é relacionado ao dimensionamento dos gaseificadores, visto que as maiores tecnologias disponíveis, não são desenvolvidos para o processamento de bagaço de cana de açúcar.

4.1.2 Caso 2: Gaseificação do volume total de bagaço da usina em fluxo de arraste e substituição da caldeira convencional pelo sistema gaseificador – turbina a gás – caldeira de recuperação (BIG-GTCC Total), com pré-tratamento do bagaço mediante a torrefação

Neste caso específico, foi considerado a gaseificação em fluxo de arraste (GFA) da totalidade de volume do bagaço de cana, além da troca da caldeira convencional por um sistema de gaseificação – turbina a gás e caldeira de recuperação (BIG-GTCC Total), utilizando como um tratamento prévio do bagaço de cana úmido, o processo de secagem e consequente torrefação da biomassa empregada.

A torrefação, conforme definido em seções anteriores é um método de pré-tratamento do bagaço que nos apresenta excelentes soluções relacionadas a baixa densidade apresentada por essa biomassa, por melhor suas propriedades energéticas, bem como características de moagem, garantindo maior facilidade de transporte, armazenamento e outros empecilhos apresentados na logística; fato esse, garantido pela natureza hidrofóbica apresentada pelo material, após o tratamento realizado (BASU, 2010). A biomassa condicionada pela

torrefação, por apresentar bom poder calorífico e boa mobilidade, além de propriedades físico-químicas semelhantes a do carvão, garante uma maior facilidade de gaseificação, pois pode ser processada em tecnologias já bem desenvolvidas que são utilizadas para gaseificar o carvão como matéria prima. Desta forma um reator de gaseificação em fluxo de arraste, pode ser utilizado.

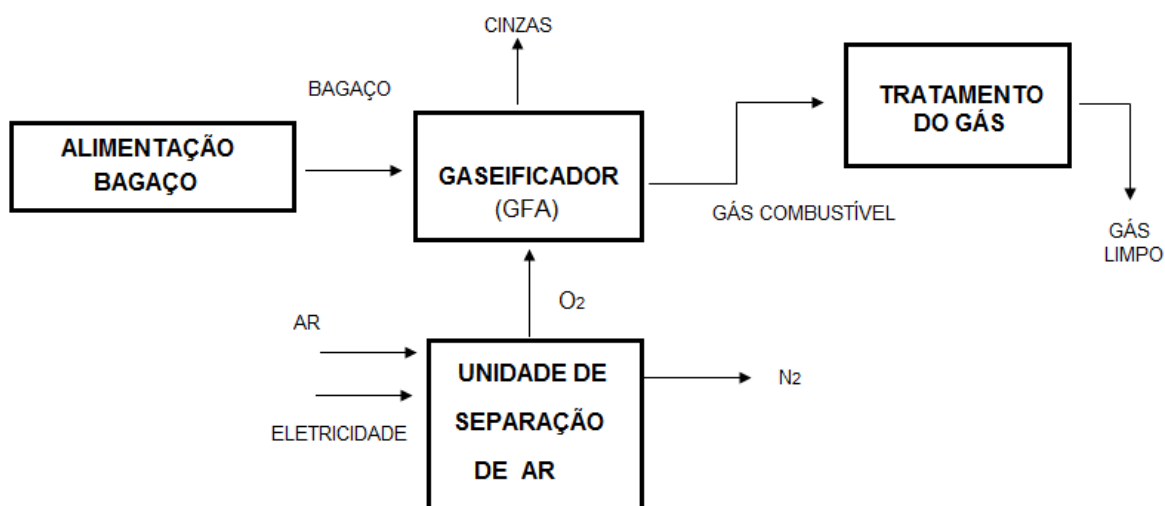
A temperatura de operação padrão para um reator de gaseificação por fluxo de arraste é entre 1473 e 1693 K, sendo o oxigênio o agente de gaseificação utilizado no processo (E4TECH, 2009; WORLEY e YALE, 2012). O gás resultante do gaseificador sofre um processo de limpeza, no qual são eliminados, contaminantes em forma de sólidos e alcatrões até que esteja em padrões aceitáveis para a alimentação da turbina a gás.

Após essa limpeza, o gás será conduzido até um compressor que o comprime em condições necessárias para a entrada na câmara de combustão da turbina a gás. O calor que escapa da turbina a gás é então recuperado na caldeira de recuperação, para consequente produção do vapor de água. Esse vapor produzido, então passará pela turbina a vapor e alimentará outro gerador, a fim de se produzir mais energia elétrica. O vapor extraído da turbina é utilizado para satisfazer as demandas do processo.

Através da Figura 24, pode-se observar o esquema para a incorporação do processo BIG-GTCCTotal.

Nesta análise a etapa de gaseificação é composta pelo reator de gaseificação em fluxo de arraste (GFA), tecnologia CHOREN Carbo-V, uma unidade criogênica que separa o ar e um sistema que irá controlar e limpar os gases produzidos. Na Figura 25, fluxo de trabalho é demonstrado.

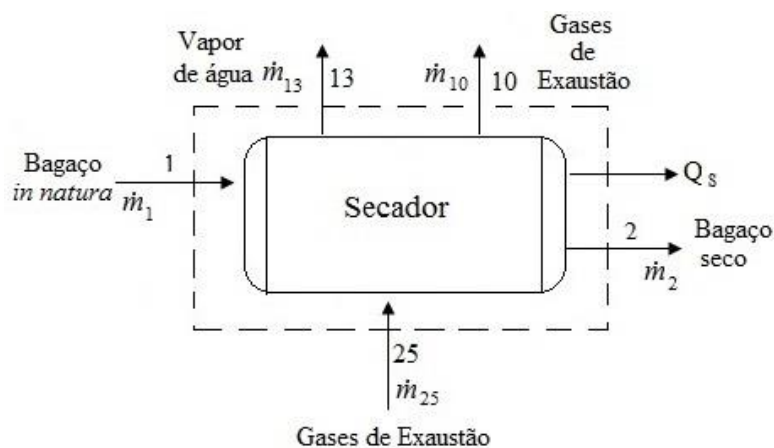
Figura 25 - Etapas de Gaseificação em Fluxo de Arraste.



Fonte: Machin (2015).

O bagaço produzido dentro da usina com umidade em torno de 50% é secado até um valor próximo de 20%, sendo que secadores industriais possui uma eficiência em torno de 80% (BASU, 2013). Depois desse processo, a biomassa é introduzida no reator de torrefação, para a finalização da secagem e torrefação. O volume de controle representado pelo secador de bagaço de cana de açúcar está ilustrado pela Figura 26.

Figura 236 - Volume de controle do secador de bagaço



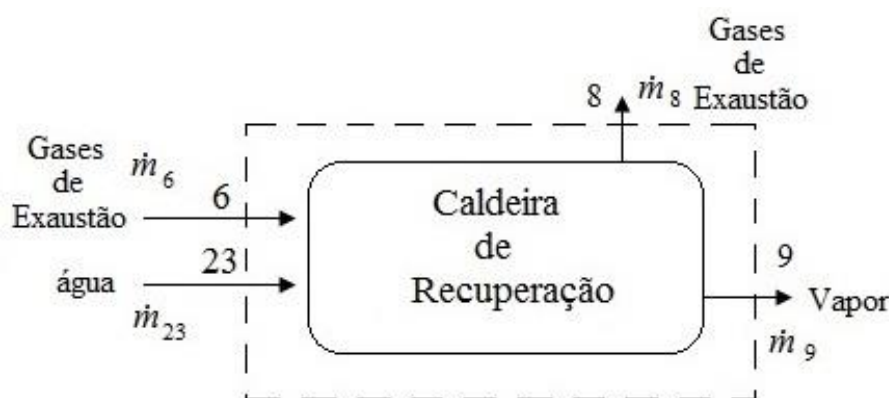
Fonte: Machin (2015).

Para se estipular o valor de energia necessária para se realizar o processo de secagem da biomassa, adota-se a entalpia de vaporização da água 2260 kJ/kg (MARSH, 1987). O balanço energético do secador é determinado pela Equação (19):

$$\dot{m}_1 \cdot + \dot{m}_{25} \cdot Cp \cdot \Delta T = + \dot{m}_{10} \cdot Cp \cdot \Delta T + \dot{m}_2 \cdot Cp_{BS} \cdot \Delta T + Q_s \quad (19)$$

A energia requerida para ocorrer o processo de torrefação é obtida pelos gases que sofrem exaustão a partir da caldeira de recuperação. O volume de controle para a caldeira de recuperação pode ser visualizado na Figura 27.

Figura 247 - Volume de controle na caldeira de recuperação.



Fonte: Machin (2015).

A energia proporcionada pela exaustão dos gases da caldeira de recuperação é calculada através da Equação 20:

$$E_{caldeira} = \dot{m}_8 \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (20)$$

Onde:

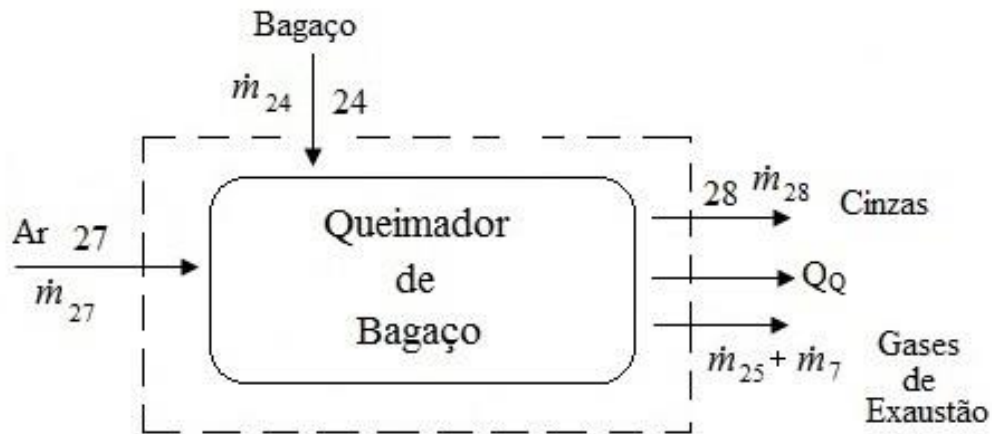
$$Cp = 1,23 \text{ kJ / kgK (KRASNOCHIOKOV; SUKOMIEL, 1977).}$$

A energia requerida para que ocorra o processo de secagem e torrefação de 68,05 kg/s de biomassa (bagaço) com 50% de umidade é 215,78 MW e a disponibilidade de energia presente na exaustão de gases da caldeira de recuperação é de 132,58 MW. Por este motivo, a fim de se garantir o calor necessário demandado pelo processo, deve-se adicionar em torno de 15,19 kg/s de bagaço a mais, além da instalação de um queimador de bagaço (GLASSMAN,

1996). O volume de controle apresentado pelo queimador de bagaço pode ser visualizado na Figura 28, enquanto a Equação 21 nos fornece o balanço energético para esse dispositivo:

$$\dot{m}_{24} \cdot PCI_{bgu} + \dot{m}_{27} \cdot h_{ar} = \dot{m}_{25+7} \cdot C_p \cdot \Delta T + \dot{m}_{28} \Delta h_{cinzas} + Q_Q \quad (21)$$

Figura 258 - Volume de controle no queimador de bagaço



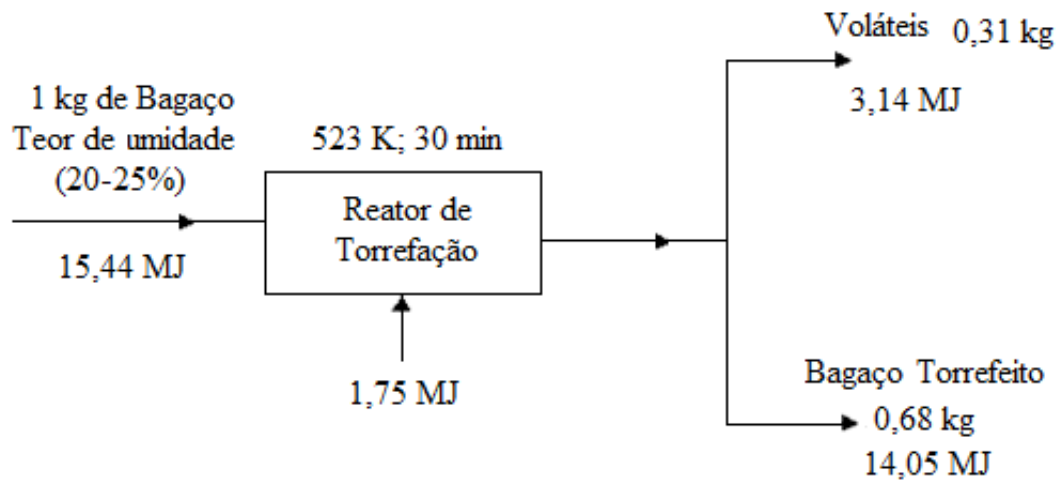
Fonte: Machin (2015).

O ar estequiométrico necessário para realizar a combustão do bagaço de cana de açúcar com a composição estima para este caso é de 3,38 Nm³ de ar para cada quilograma de biomassa. Além disso, é adotado o excesso de ar em 1,4 para a combustão proporcionada pela queimador de bagaço implementado.

A Equação 22 e Figura 29 nos fornece o balanço de massa e energia para o processo de torrefação de 1 kg de bagaço de cana de açúcar que apresenta um teor de umidade em torno de 25%, durante um tempo de 0,5 horas a uma temperatura em torno de 520K, baseado em resultados práticos apresentados por Pimchuai; Dutta e Basu (2010).

Na Figura 30 fica representado o volume de controle apresentado pelo reator de torrefação.

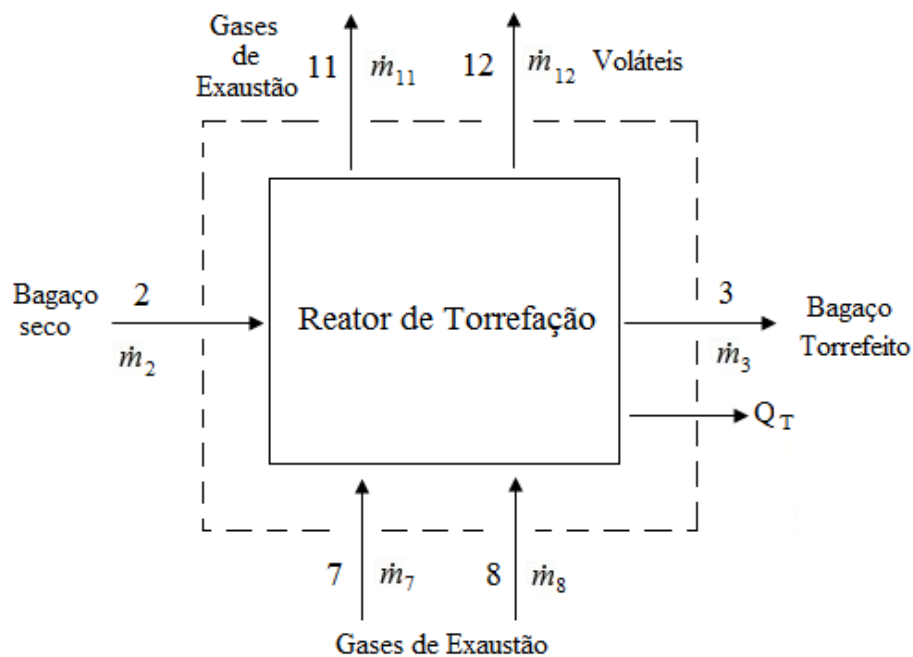
Figura 269 - Balanço de massa e energia no torrefator de bagaço de cana a uma temperatura de 520 K, 30 min.



Fonte: Pimchuai; Dutta; Basu (2010).

Podemos analisar que depois da realização da torrefação, a biomassa apresenta 90% da energia inicial e 70% da massa inicial, enquanto os compostos voláteis possuem 30% e 10% de massa e energia inicial, respectivamente. Dessa forma, constatamos uma densificação energética do produto obtido.

Figura 30 - Volume de controle no reator de torrefação.



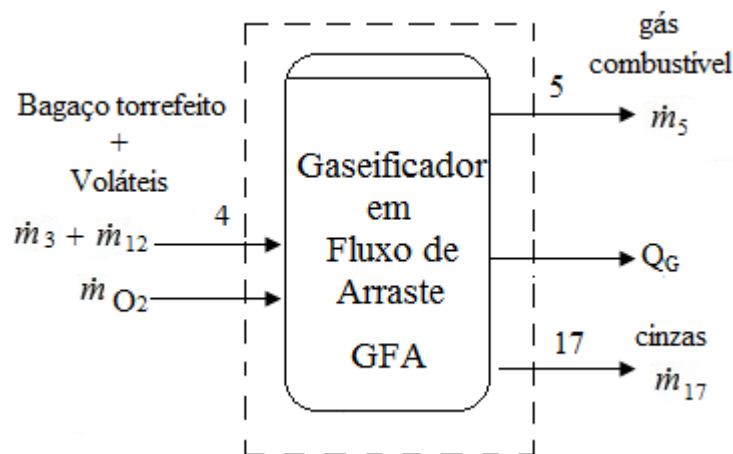
Fonte: Machin (2015).

O balanço energético no reator de torrefação é apresentado pela Equação :

$$\dot{m}_2 \cdot PCI_{bgs} + Q = \dot{m}_3 \cdot PCI_{bgTorref} + \dot{m}_{12} \cdot (\Delta h_{voláteis} + PCI_{voláteis}) + \dot{m}_{11} \cdot Cp \cdot \Delta T + Q_T \quad (22)$$

Os voláteis que são produzidos são diretamente empregados no processo de gaseificação, pelo fato de possuírem alto valor energético. O produto sólido originado no reator de torrefação é fornecido a um moinho, que irá proporcionar uma diminuição do tamanho do bagaço tratado, até que o material esteja com dimensões adequadas para a alimentação direta ao gaseificador. O volume de controle para o balanço de energia e massa para o GFA é representado pela Figura 31.

Figura 31 - Volume de controle no GFA (Gaseificador em Fluxo de Arraste)



Fonte: Machin (2015).

A Equação 23, nos fornece o balanço energético no gaseificador de fluxo de arraste (GFA), sendo utilizado o oxigênio como agente de gaseificação em condições padrões:

$$\begin{aligned} \dot{m}_3 \cdot PCI_{bgTorref} + \dot{m}_{12} \cdot (\Delta h_{voláteis} + PCI_{voláteis}) \\ = \dot{m}_5 (\Delta h_g + PCI_g) + \dot{m}_{17} \Delta h_{cinzas} + Q_G \end{aligned} \quad (23)$$

Os resultados de toda a análise energética são apresentados pela Tabela 13.

Para que essa configuração possa ser utilizada, necessita-se de uma unidade de pré-tratamento de biomassa com capacidade de secagem e torrefação para em torno de 244,98 t/h

de bagaço, considerando que esta apresenta umidade especificada em torno de 50%, além de um gaseificador de fluxo de arraste (GFA), de tecnologia CHOREN Carbon-V, com capacidade de processamento de 500MW, além de um sistema de limpeza e controle dos gases produzidos. Além disso, neste caso o GFA será alimentado por uma turbina a gás da empresa Siemens Energy modelo SGT6-5000F.

Tabela 13 - Resultados da análise energética com a utilização da gaseificação do volume total para a cana de açúcar pré-tratada por torrefação.

(continua)

Pontos	Fluxo Mássico[kg/s]	Temperatura [K]	Pressão[kPa]	Fluxo de Energia[MW]
1	68,05	298	101,3	498,19
2	47,64	333	101,3	498,19
3	33,34	373	101,3	453,36
4	47,64	373	101,3	553,01
5	56,31	323	1931	442,40
6	468,65	860	107	275,17
7	10,74	1.278,93	101,3	12,11
8	468,65	544	101,3	132,58
9	41,67	803	6.468,0	145,4
10	75,89	552,94	101,3	22,25
11	479,39	474,04	101,3	97,05
12	14,29	373	101,3	99,64
13	20,42	373	101,3	54,64
14	-	-	-	2,27
15	412,34	298	101,3	0
16	-	-	-	167,23
17	2,88	298	101,3	0
18	-	-	-	16,7
19	33,53	803	6.468,0	116,96
20	5,75	316	8,5	14,82
21	17,78	420,3	245	49,05
22	10	699,3	2.650,0	32,95
23	41,67	380,1	8.820,0	18,92
24	15,19	298	101,3	111,25

Tabela 14 - Resultados da análise energética com a utilização da gaseificação do volume total para a cana de açúcar pré-tratada por torrefação.

(conclusão)

Pontos	Fluxo Mássico[kg/s]	Temperatura [K]	Pressão[kPa]	Fluxo de Energia[MW]
25	75,89	1.278,93	101,3	76,89
26	48,10	298	101,3	0
27	71,66	298	101,3	0
28	0,23	373	101,3	40,19
29	38,00	298	101,3	-

Fonte: Machin (2015).

Utilizando essa configuração para a matriz, será demandado uma fonte externa de bagaço de cana, 73,6% do bagaço total utilizado para suprir as demandas de vapor da planta de cogeração ($\dot{m}_{TN}=299,66$ t/h), estipulado pela soma de bagaço disponível na usina com o necessário de biomassa para se efetuar o processo de gaseificação e o adicional necessário para o processo de combustão no queimador. A eficiência da geração de energia elétrica pode ser calculada pela Equação (24):

$$\eta_{ge} = \frac{E_{tge} + E_{tve} - W_b}{E_{comb}} \quad (24)$$

A Eficiência global do sistema avaliado (ciclo combinado com emprego de gaseificação em fluxo de arraste) é calculado pela Equação (25):

$$\eta_{gl} = \frac{E_{tge} + E_{tve} + W_{mec} + Q_{proc} - W_b}{E_{comb}} \quad (25)$$

Tabela 15 - Eficiências relacionadas a geração de energia elétrica, calor, energia mecânica, global e potência total gerada com o emprego do sistema definido pelo Caso 2

Tecnologia	η_{ge} [%]	η_{Qpr} [%]	η_{emec} [%]	η_{gl} [%]	E_{te} [MW]
Convencional	12,9	61,9	2,73	77,53	19,13
BIG-GTCC*	42,0	20,1	0,88	62,98	186,36
BIG-GTCC**	26,6	12,7	0,56	39,86	186,36

* Considerando E_{comb} do gás de síntese. ** Considerando o E_{comb} do bagaço.

Fonte: Machin (2015).

Ao comparar os resultados indicados na Tabela 14, podemos analisar que a eficiência global da planta diminui quando comparada com sua configuração tradicional, fato este justificado pela necessidade de compra de volume adicional de bagaço. Por outro lado, a eficiência relacionado a geração de energia elétrica irá aumentar.

Com isso, podemos determinar que a utilização de gaseificação em fluxo de arraste em conjunto com pré-tratamento por torrefação, acarreta uma maior geração de eletricidade na usina avaliada.

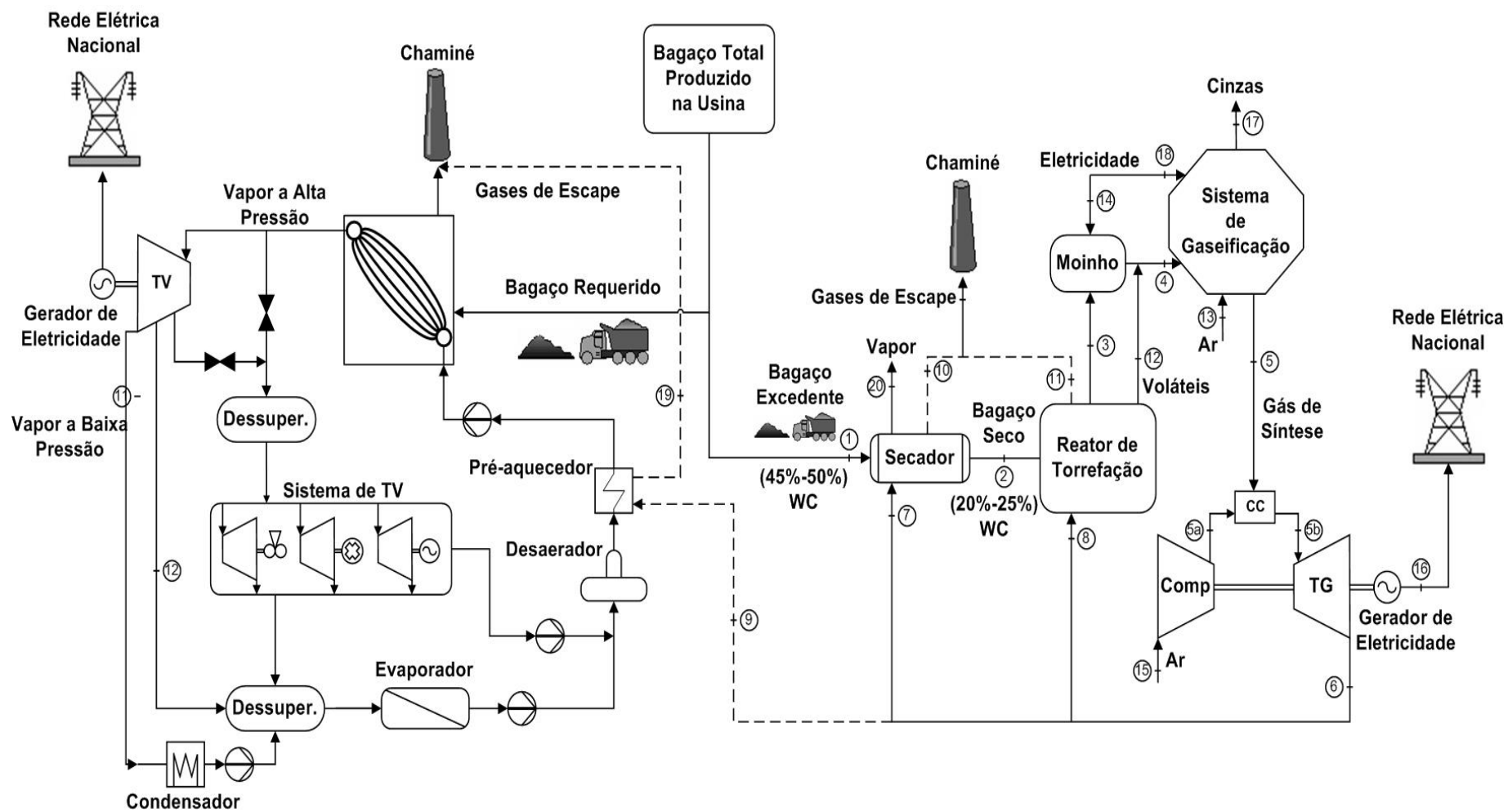
4.1.3 Caso 3: gaseificação do excedente de bagaço da usina convencional considerando a torrefação como processo de pré-tratamento do bagaço (BIG-GTCC “parcial”)

Na implementação do processo parcial do BIG-GTCC os dispositivos responsável pela cogeração da fábrica que irão fornecer o vapor requerido. A configuração do processo de BIG-GTCC “parcial” pode ser observada na Figura 32.

O emprego deste tipo de tecnologia estudado nesse caso, como forma de pré-tratamento da biomassa, apresenta muitas vantagens quando comparada com o processo de BIG-GTCC “total. Nessa configuração será possível obter uma maior geração de energia elétrica, sem que alteremos os dispositivos e instalação presentes na usina. Outro fator relevante, é o fato de que as dimensões da configuração só serão estabelecidas pela quantidade de bagaço disponível (bagaço excedente do processo). A implementação desse projeto, possibilita além disso, a geração de energia elétrica tanto dentro da estação e safra, quanto fora da estação de safra, tornando possível inclusive a utilização de outra fonte de matéria prima renovável. Na Figura 26, está demonstrada o ciclo tradicional da usina, funcionando de forma paralela com a gaseificação de excedente de bagaço.

No emprego desta tecnologia o bagaço possui cerca de 50% de umidade, sendo secado em até 25% por um secador com 80% de eficiência, como determinado por Basu (2013) para secadores industriais, sendo em seguida, alimentado dentro do reator de torrefação. A energia necessária para que o processo de secagem e torrefação ocorra, é proporcionada pelos gases de exaustão da turbina a gás.

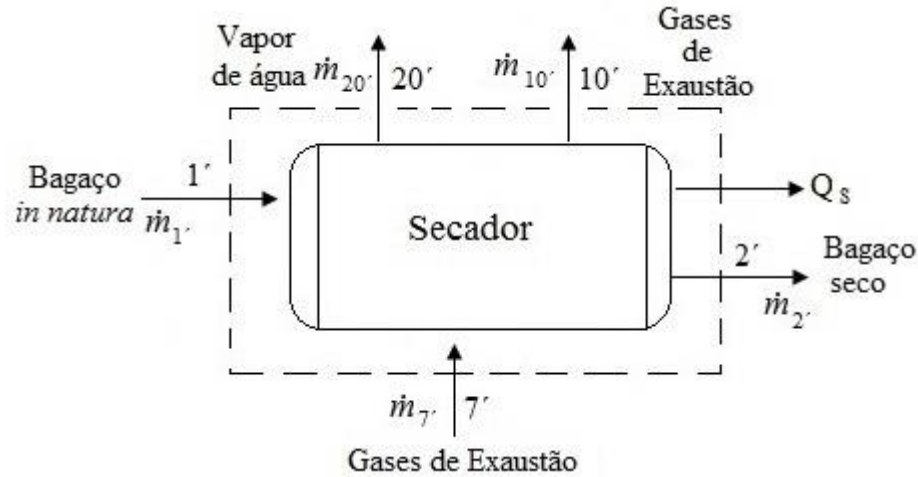
Figura 32 - Caso 3: Gaseificação do excedente de bagaço disponível na usina.



Fonte: Machin (2015).

O volume de controle representado pelos dispositivos: secador e reator de torrefação é demonstrado pela Figura 33 e Figura 34 respectivamente.

Figura 33 - Volume de controle no secador do excesso de bagaço de cana.



Fonte: Machin (2015).

Através da Equação (26) é apresentado o balanço de energia no secador do bagaço de cana:

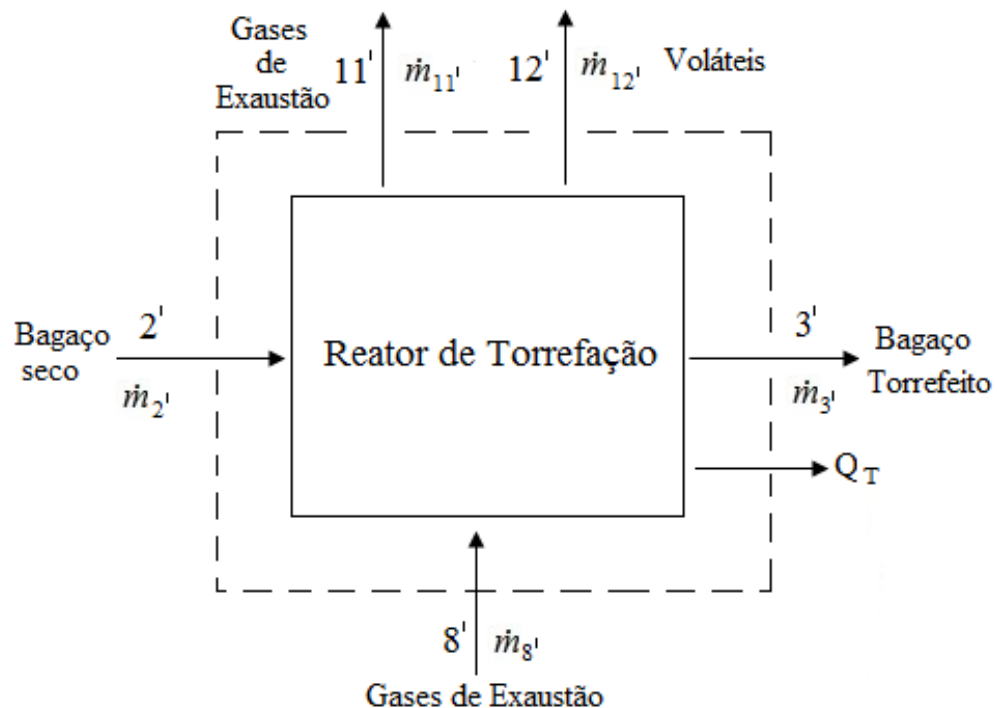
$$\dot{m}_{1'} \cdot C_p \cdot \Delta T = +\dot{m}_{10'} \cdot C_p \cdot \Delta T + \dot{m}_{2'} \cdot C_{p_{BS}} \cdot \Delta T + Q_s \quad (26)$$

A vazão de bagaço de cana que sai do secador, é determinado pela Equação (27), considerando uma umidade em torno de 30% na saída desse dispositivo.

Para obter a vazão do bagaço após o processo de torrefação, foi realizado um balanço energético, considerando o volume de controle no reator. Na Figura 35, pode-se observar esse volume, e na Equação (27) é determinada essa vazão.

$$\dot{m}_{2'} \cdot PCI_{bgs} + Q = \dot{m}_{3'} \cdot PCI_{bgTorref} + \dot{m}_{12'} \cdot (\Delta h_{voláteis} + PCI_{voláteis}) + \dot{m}_{11'} \cdot C_p \cdot \Delta T + Q_T \quad (27)$$

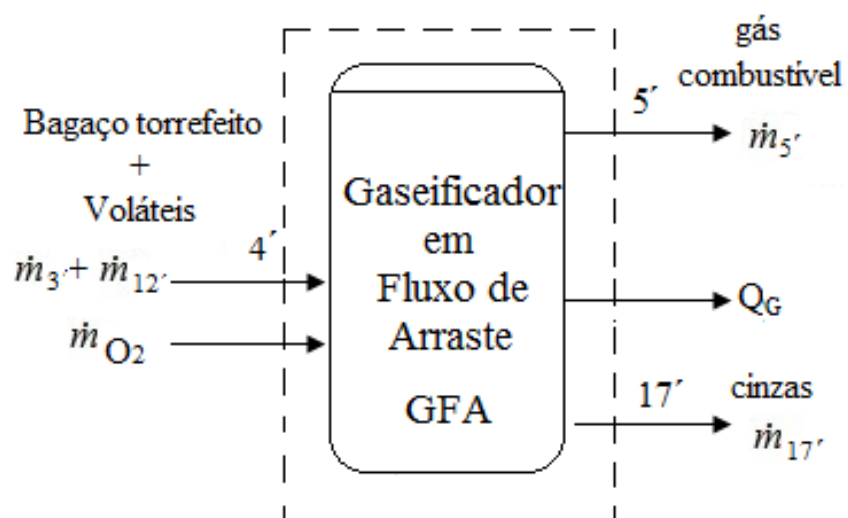
Figura 27 - Volume de controle no reator de torrefação do excesso de bagaço de cana.



Fonte: Machin (2015).

Na gaseificação é utilizado diretamente os produtos voláteis resultantes da torrefação. A tecnologia de gaseificação utilizada permite o uso desses gases no processo, que possuem alto teor energético.

Figura 28 - Volume de controle no gaseificador em fluxo de arraste (GFA).



Fonte: Machin (2015).

A biomassa já torrefeita é introduzida em um moinho, onde ocorrerá a redução de suas dimensões, até que esteja em um tamanho de partícula adequada, para que possa ser introduzida em um Gaseificador em Fluxo de Arraste (GFA), como ilustrado pela Figura 35.

Utilizando como base a Equação (26), o balanço energético, utilizando o oxigênio como agente de gaseificação em condições padrões, no gaseificador em fluxo de arraste é determinado pela Equação (28):

$$\dot{m}_3 \cdot PCI_{bgTorref} + \dot{m}_{12} \cdot (\Delta h_{voláteis} + PCI_{voláteis}) = \dot{m}_5 (\Delta h_g + PCI_g) + \dot{m}_{17} \Delta h_{cinzas} + Q_G \quad (28)$$

Após realizada a gaseificação, o gás passará para a turbina a gás, gerando dessa forma, um adicional de energia elétrica.

Através da Equação (29), foi determinado o E_{comb} do excedente de bagaço.

$$E_{comb(BE)} = \dot{m}_{bge} \cdot PCI_{bge} \quad (29)$$

A produção de energia pelo gás de síntese ($E_{comb(GSBE)}$) é calculada pela Equação (30):

$$E_{comb(GSBE)} = [\dot{m}_3 \cdot PCI_{bgTorref} + \dot{m}_{12} \cdot (\Delta h_{voláteis} + PCI_{voláteis})] \cdot \eta_{gase} \quad (30)$$

Através desse parâmetro, é possível calcular a energia elétrica originada na turbina a gás com o bagaço em excesso pela Equação (31):

$$E_{pTG} = E_{combGSBE} \cdot \eta_{tg} \quad (31)$$

Na utilização dessa configuração, considera-se um sistema de gaseificação em fluxo de arraste de tecnologia CHOREN Carbo -V[®], com capacidade de processar 20 MW(térmicos), separação de ar por uma unidade criogênica e controle dos gases produzidos, bem como sistema de limpeza, além disso, um sistema de turbina a gás Roll Royce, Modelo 50-KH5.

Os parâmetros referentes a turbina a gás utilizada, estão apresentados na Tabela 15, segundo GTW (2012):

Tabela 16 - Turbina a gás selecionada e seus parâmetros.

Nome do Fabricante	Roll Royce
Modelo	501-KH5
E_{tge} [kW]	6 447
Eficiência [%]	40,1
Vazão mássica dos gases de exaustão [kg/s]	18,45
Temperatura de exaustão [K]	803

Fonte: GTW (2012).

Os resultados da análise térmica da implementação do sistema de tecnologia BIG-GTCC “parcial”, na usina em questão avaliada com a gaseificação o excesso de bagaço de cana no processo (8,4 t/h), com uma umidade de 50% em base úmida e PCI de 7,32 MJ/kg, é apresentado pela Tabela 11. Em nossa avaliação, é adotado como eficiência para o reator de torrefação o valor de 60% (BASU, 2010).

Analisando a Tabela 11, o uso dessa configuração acarretará uma produção líquida de 5,53 MW de energia elétrica para a comercialização, utilizando apenas o bagaço que está em excesso na configuração convencional da usina. Além disso, será possível efetuar um aquecimento prévio da água na entrada da caldeira, através dos gases de escape da turbina a gás. O rendimento global da planta, pode ser aumentado por consequência desses fatores.

Através do emprego da tecnologia de gaseificação CHOREN Carbo - V®, será produzido um gás frio de alta eficiência e a capacidade de gaseificar um gás rico em alcatrão originado durante a torrefação, possibilitam que a introdução do processo de pré-tratamento da biomassa por torrefação, não origine perdas significativas da eficiência da planta. A eficiência de geração de eletricidade da planta, poderia ser aumentada através da introdução de uma caldeira e recuperação e uma turbina a vapor para a produção de eletricidade em ciclo combinado com a turbina a gás, contudo seria necessário uma fonte externa de energia para que o corra o processo de secagem e torração, o que acarretaria uma redução na eficiência global da planta. No caso avaliado, a eficiência de geração da energia elétrica foi de 15,43%.

Os resultados referentes a análise energética para o Caso 3, podem ser analisados na Tabela 16

Tabela 17 - Resultados da análise energética com a implementação da gaseificação do volume de bagaço de cana em excesso da usina.

Pontos	Fluxo Mássico [kg/s]	Temperatura [K]	Pressão [kPa]	Fluxo Energia [MW]
1'	2,33	298	101,3	17,05
2'	1,30	333	101,3	17,05
3'	0,88	353	101,3	15,41
4'	0,88	313	101,3	15,41
5'	1,51	1073	1931	15,59
6'	18,42	803	107	9,20
7'	7,77	803	107	3,88
8'	7,92	803	107	4,00
9'	2,73	803	107	1,32
10'	7,77	552	101,3	1,55
11'	7,92	550,5	101,3	1,6
12'	0,40	394	101,3	4,08
13'	1,26	298	101,3	-
14'	-	-	-	0,077
15'	16,89	298	101,3	-
16'	-	-	-	6,23
17'	0,03	298	101,3	0
18'	-	-	-	0,62
19'	2,73	480,5	101,3	0,26
20'	1,03	373	101,3	2,33

Fonte: Machin (2015).

Através dos resultados obtidos e que estão disponíveis na Tabela 17, podemos observar uma baixa diminuição da eficiência global e um aumento na eficiência de geração de energia elétrica, em relação a usina convencional.

Tabela 18 - Eficiências relacionadas a geração de energia elétrica, calor, energia mecânica, global e potência total gerada quando gaseificado o volume em excesso de bagaço de cana da usina.

Tecnologia	η_{ge} [%]	η_{Qpr} [%]	η_{emec} [%]	η_{gl} [%]	E_{tg} [MW]
Convencional	12,9	61,9	2,73	77,53	19,13
BIG-GTCC*	15,43	55,31	2,44	73,18	25,57

* Considerando o E_{comb} do bagaço.

Fonte: Machin (2015).

Através dessas informações, avaliamos que a utilização da tecnologia BIG-GTCC “parcial” com a utilização de gaseificadores em fluxo de arraste alimentados com bagaço de cana tratado por torrefação, se apresenta como uma alternativa palpável para o aumento da geração de eletricidade na usina. A implementação da BIG-GTCC “parcial” combinada com a torrefação apresenta ainda uma alternativa melhor quando comparada com o processo de BIG-GTCC “total”, devido ao último apresentar elevada necessidade de investimento e alto percentual de energia externa para operar de forma adequada.

Nesta seção, concluímos que a utilização do sistema BIG-GTCC “parcial”, gaseificando o volume em excesso do bagaço de cana da usina, se torna uma alternativa mais atraente. O processo de pré tratamento da biomassa combinado com a gaseificação em fluxo de arraste de tecnologia CHOREN tipo Carbo-V® proporcionará uma eficiência de geração elétrica próxima de 16%, se que a eficiência global sofra grandes perdas, em comparação ao ciclo convencional. A única matéria prima utilizada na configuração parcial, é o bagaço de cana excedente da usina com umidade em torno de 50%.

4.2 ANÁLISE DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DO CASO 1 E CASO 2

As configurações propostas no Caso 1 e Caso 2, são semelhantes conforme podemos analisar na Figura 15 e na Figura 20, respectivamente. As configurações diferenciam-se pela introdução do processo de torrefação, no caso 2, como forma de condicionamento do bagaço de cana, para dar solução aos problemas descritos anteriormente na alimentação continua a um reator de gaseificação com bagaço in natura; além disso o processo de torrefação possibilita o emprego de sistemas de gaseificação mais eficientes que a Gaseificação em Leito

Fluidizado. O Gaseificador de Fluxo de Arraste é uma dessas tecnologias mais eficientes, e já é bem utilizado para gaseificar principalmente o carvão mineral, que possui características físico químicas semelhantes ao bagaço torrefeito (ainda que diferentes no poder calórico).

Nesta seção, pretendemos avaliar o impacto global da introdução dessa tecnologia no sistema proposto. De forma de analisar se os benefícios citados ao longo do trabalho para um processo de torrefação, podem ser obtidos, sem que ocorra um incremento significativo na demanda energética global do processo.

Analisando o Caso 1, podemos observar que a energia total é fornecida ao sistema se dá exclusivamente pelo bagaço de cana com umidade de 50% introduzido no secador, representado pelo Ponto 1 (Figura 15). A vazão mássica desse ponto é 80,58 kg/s, e como o bagaço com essa umidade, apresenta um Poder Calorífico Inferior de 7,32 MJ/kg, o fluxo energético equivalente a esse fluxo mássico corresponde a 589,9 MW.

Fazendo um comparativo com o Caso 2, vemos que de forma diferente, para que o processo de torrefação possa ser implementado, são necessárias duas alimentações com bagaço de cana de açúcar com 50% de umidade. A primeira alimentação de bagaço, ocorre diretamente no secador, representado pelo Ponto 1 (Figura 20). Nesse ponto a vazão mássica do bagaço introduzido é de 68,05 kg/s, representando um fluxo energético de 498,19 MW. A segunda alimentação, ocorre no queimador de bagaço, representado pelo Ponto 24. O queimador de bagaço requer de 15,19 kg/s e consequentemente um fluxo energético de 111,25 MW para poder fornecer a energia necessária para o processo de secado do bagaço úmido para, além de satisfazer parte dos requerimentos energéticos do reator de torrefação. Deste modo, o Caso 2, demanda uma quantidade total de vazão mássica de bagaço de cana úmido, igual a 83,24 kg/s e consequentemente um consumo energético do sistema igual a 609,44 MW.

A diferença entre as duas configurações propostas, portanto, consiste numa maior alimentação de bagaço de cana na configuração apresentada no Caso 2, sendo necessários 2,66 kg/s de bagaço úmido a mais, quando comparado com o Caso 1; o que equivale a 3% de incremento.

Esse investimento a mais necessário na alimentação de bagaço, proporciona o seguinte comparativo, conforme citado abaixo:

- Diminuição de 0,74% da eficiência global e de 0,50% na eficiência de geração de eletricidade considerando a potência suprida pelo bagaço;

- Melhorias na densidade energética da biomassa, bem como aumento da relação Carbono/Oxigênio no bagaço de cana torrefeito. O bagaço torrefeito a uma temperatura de 523 K após 15, 30, 45 minutos apresentou, respectivamente, um poder calorífico superior de 19,88; 20,57; 20,72 MJ/kg.

- Maior eficiência na alimentação do sistema de gaseificação, pela redução das dimensões do bagaço de cana, mediante ao processo moído.

- Maior possibilidade de armazenamento e transporte do bagaço pré-condicionado, pela diminuição da umidade do material e sua consequente degradação.

- O bagaço poderá ser empregado como fonte de combustíveis em reatores utilizados para processamento de carvão mineral, o que torna possível a gaseificação do material empregando tecnologias comercialmente disponíveis.

4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DO CASO 3

Conforme os resultados apresentados na Seção 4, a gaseificação de bagaço de cana excedente se tornou a opção mais atrativa quando comparado aos outros métodos de gaseificação citados no trabalho. Contudo é necessário discutir o impacto de se adicionar um sistema de torrefação para fazer o tratamento do excedente de biomassa.

Quando o tratamento por torrefação é empregado, os voláteis e o sólido produtos do processo são introduzidos diretamente no gaseificador com uma vazão mássica de voláteis de 0,40 kg/s e um fluxo energético de 4,08 MW, e uma vazão mássica de 0,88 kg/s e fluxo de energia de 15,41 MW do bagaço de cana torrefeito. É necessária também a introdução de 1,26 kg/s de oxigênio para o funcionamento do gaseificador. O Fluxo de energia total utilizado na alimentação do gaseificador para esse caso é de 19,49 MW.

Se supormos uma alimentação do excedente de bagaço de cana do sistema de gaseificação sem tratamento por torrefação, essa introdução se limita ao bagaço que sairia diretamente do secador, representado no esquema da Figura 26, pelo Ponto 2. Esse ponto possui vazão mássica de 1,30 kg/s e fluxo de energia de 17,05 MW. Lembrando

que como a biomassa não estaria condicionada, não seria possível a utilização de um gaseificador de fluxo de arraste, então seria necessário empregar um gaseificador de leito fluidizado borbulhante, como é utilizado no caso 1.

Dessa forma, podemos concluir que a implementação de um reator de torrefação para a gaseificação do excedente de bagaço de cana, proporciona um maior fluxo de energia na alimentação do gaseificador. Essa diferença é de 2,44 MW representando um acréscimo de 14% na configuração sem tratamento, o que fortalece ainda mais a defesa para a utilização dessa configuração.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Ao longo do desenvolvimento desse estudo, foi realizada uma revisão dos sistemas de gaseificação de biomassa, com ênfase nos Gaseificadores de Leito Fixo, Gaseificadores de Leito Fluidizado e Gaseificadores em Fluxo de Arraste. A conclusão estabelecida acerca dos tipos de gaseificadores é que o Gaseificador em Fluxo de Arraste, é o mais recomendado para se gaseificar o bagaço de açúcar após a torrefação; tecnologia bem desenvolvida e comercialmente disponível.

No trabalho foi realizado um estudo acerca das diferentes tecnologias de torrefação, e foi concluído que a tecnologia mais interessante para o condicionamento do bagaço de cana é a combinação dos efeitos de Torrefação e Pelletização. As principais vantagens do emprego deste processo, é um elevado valor calorífico, uma natureza hidrofóbica, a boa moagem através da torrefação, e alta densidade energética obtida pela granulação. Contudo, para que essa tecnologia possa ser empregada em Gaseificadores de Fluxo de Arraste é necessário que a biomassa torrefeita passe por um processo de moagem, para que as partículas possuam dimensões micrométricas.

Avaliamos ainda, que através do emprego do processo de torrefação a uma temperatura de 523 K, o bagaço apresentou incremento no seu poder calorífico superior, para diferentes intervalos de tempo. Após 15 minutos o PCS é de 19,88 MJ/kg, após 30 minutos o PCS é de 20,57 MJ/kg e após 45 minutos o PCS sobe para 20,72 MJ/kg.

Foram propostos além da implementação do sistema BIG-GTCC, o condicionamento da biomassa (bagaço de cana) através do processo de torrefação, afim de se obter propriedades energéticas melhores e propriedades físicas mais interessantes para o emprego desse biocombustível em um GFA (Gaseificador de Fluxo de Arraste). Observando o estudo envolvendo a análise energética, todos os casos estudados, apresentaram vantagens na geração de eletricidade quando comparado com a configuração original da usina.

Foi estabelecido ainda uma comparação de viabilidade entre a implementação do sistema BIG-GTCC “total” sem pré-tratamento do bagaço, com o sistema BIG-GTCC “total” mediante pré-tratamento por torrefação. Foi concluído que apesar de melhorias nas propriedades físico químicas da biomassa pré tratada, essas melhorias demandam alta quantidade adicional de bagaço, o que pode inviabilizar a implementação. Considerando a usina avaliada (Destilaria Pinheiros safra 2005/2006), serão necessárias em torno de 4 usinas

com produção equivalente de bagaço de cana, para suprir a demanda de biomassa empregada na alimentação do sistema BIG-GTCC “total” (Caso 1 e Caso 2).

O sistema BIG-GTCC “parcial” apresentou-se como alternativa mais atraente, dentre os três casos. Apesar de não ter sido um comparativo mais assíduo entre os casos, como foi realizado no Caso 1 e Caso 2, por motivos de diferença entre processos, o Caso 3 foi o que apresentou maior incremento de energia elétrica gerada. Além disso, foi efetuada uma análise para o impacto de se adicionar a torrefação no sistema BIG-GTCC “parcial”, fortalecendo a ideia de que o tratamento aumenta o fluxo de energia da biomassa na entrada do gaseificador, além de possibilitar o emprego de tecnologias mais estabelecidas.

Esse incremento na geração de energia elétrica proporcionado pelos casos estudados, não substitui a produção da demanda principal no setor sucroalcooleiro (etanol e açúcar). Toda essa produção, trata-se de um valor adicional, que influencia no resultado de toda a operação.

Com a implementação do sistema BIG-GTCC “total” obteve-se uma eficiência de geração de energia elétrica de 27,1%, uma eficiência global de 40,6% e o consumo de Bagaço foi de 80,58 kg/s. Para o caso do sistema BIG-GTCC “total” com pré tratamento por torrefação foi determinada uma eficiência na geração de energia elétrica de 26,6%, a eficiência global alcançou um 39,86% com um consumo de Bagaço superior ao obtido na configuração do Caso 1, igual a de 83,24 kg/s. Na implementação do sistema BIG-GTCC “parcial” com tratamento por torrefação obteve-se uma eficiência na geração de energia elétrica de 15,43% a qual é inferior à obtida nos casos anteriores, mas com uma eficiência global de 73,18%. O consumo de Bagaço nesta configuração foi de 2,33 kg/s, suprido pelo fluxo excedente da usina.

A conclusão final do trabalho, é que a utilização de bagaço de cana na geração de energia no setor sucroalcooleiro é uma pratica tradicional, mas que essa realidade ainda pode ser melhorada mediante a introdução do sistema BIG-GTCC “parcial”, prévio processo de pré tratamento do bagaço úmido por torrefação.

Como complemento do trabalho apresentado, seria interessante estudar a viabilidade econômica da utilização de cada processo, fazendo uma comparação entre os casos, afim de determinar se além dos benefícios energéticos proporcionados, os valores referentes a gastos, estão dentro da realidade do cenário econômico da indústria.

REFERÊNCIAS

- AGBLEVOR, F. A.; CHUM, H. L.; JOHNSON, D. K. Compositional analysis of biomass feedstocks by near infrared reflectance spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**, Orlando, v.11, n. 5, p. 365-370, maio 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953496000396> >. Acesso em: 25 mar. 2018.
- AGB-LLC. Jean-Paul Bourgeois. **Thermocondensed lignocelluloses material, and a method and an oven for obtaining it**. US patent. 4954620. 03/1989. Disponível em: <<http://patents.com/us-4954620.html>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- ANDRADE, R. V. **Gaseificação de biomassa**: uma análise teórica e experimental. 2007. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- ARCATE J. R, Torrefied wood, en enhanced fuel. In: BIENNIAL BIOENERGY CONFERENCE : bioenergy for the environment, 10., 2002, Idaho. **Proceedings...** Idaho, 2002. p. 22-26.
- ARMINES (United States). Schwob Yvan. **Process for converting ligneous matter of vegetable origin by torrefaction, and product obtained thereby**. US4553978, 28 ago. 1982.
- AZEREDO, V. M. C. **Setor sucro-alcooleiro brasileiro**: evolução e perspectivas. Rio de Janeiro: BNDES, 2007.
- SILVA, M. B.; MORAIS, A. S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e grau de compactação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-07avaliacao-energetica-do-bagaco-de-cana-em-diferentes-niveis-de-umidade-e-graus-de-compactacao.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Third edition. Halifax: Academic Press, 2006.
- BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis**: practical design and theory. Academic Press: 2010. 460 p.
- BERGMAN, P. C. A. et al. **Torrefaction** for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. Report ECN-C--05-013, Ohio, 2005.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, Birmingham, v. 38, p.68-94, mar.2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411000638?via%3Dihub#aep-keywords-id20>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- CAMARGO, C. A.; USHIMA, H. A. Conservation of energy in the sugar and alcohol industry. São Paulo: IPT- Institute of Technological Research of Sao Paulo, [1992].

DANTAS, G. A.; LEGEY, L. F.L.; MAZZONE, A. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Rio de Janeiro, v. 21, n.1, p. 356-364, maio 2013. Disponível em : < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006946>>. Acesso em 25 mar. 2018.

DAYTON, D. C. et al. Release of inorganic constituents from leached biomass during thermal conversion. **Energy and Fuels**, California, v.13, n.4, p. 860-870, abr. 1999. Disponível em: < <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef980256e>>. Acesso em: 25 mar. 2018

DI BLASI, C.; LANZETTA, M. Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Venice, v.41, p.287-304, maio1997. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237097000284>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

E4TECH. **Review of technology for the gasification of biomass and wastes**. 2009. Disponível em: < <http://www.e4tech.com/2009/report/>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

EID, F.; CHAN, K.; PINTO, S. S. Mudanças tecnológicas e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Recife, v. 2, n. 1, p. 48-57, maio 1998. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1997_T3509.PDF>. Acesso em: 25 mar. 2018.

FELFLI, F.; LUENGO, C. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 19-22, set. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082608605190>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

FILIPPIS, P.; BORGIANNI, C.; PAOLUCCI, M.; POCHETTI, F. Gasification process of Cuban bagasse in two-stage reactor. **Biomass and Bioenergy**, Rome, v. 27, n.3, p. 247-252, set. 2008. Disponível em: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953404000273>. Acesso em: 25 mar. 2018.

FIOMARI, M. C. **Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão**. 2004 130 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

GABRA, M.; PETTERSSON, E.; BACKMAN, R.; KJELLSTROM, B. Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue: part 1: gasification of bagasse. **Biomass and Bioenergy**, Luleå, v. 21, n. 5, p. 351-369, set. 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953401000435>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

GABRA, M.; SALMAN, H.; KJELLSTRÖM, B. Development of a sugar cane residue feeding system for a cyclone gasifier. **Biomass and Bioenergy**, Gotland, v. 15, n. 2, p. 143-153, ago. 1998. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953497100356>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

GIRARD, P.; SHAH, N. “Developments on torrefied wood - an alternative to charcoal for reducing deforestation”, **FAO paper**, Nogent-Sur-Marne, v.1, n.3, p. 23-25, out. 2005. Disponível em: <<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016038506>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

GLASSMAN, I. **Combustion**. Third Edition. San Diego: Academic Press, 1996. 631 p.

HONJO, T. et al. Prospect on new fuel BCDF (BIOCARBONISED-DENSIFIED-FUEL: the effect of semi-carbonisation. In: WORLD CONFERENCE ON PELLETS, 11., 2002, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm, 2002. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmeicope/2003.2/0/2003.2__2-73/_article/-char/ja/>. Acesso em: 25 mar. 2018.

INNOCENTE, A. F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana de açúcar**: estudo de caso. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, Botucatu, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/90495>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

INTEGROFUELS. **Properties of fuels**. 2011. Disponível em: <<http://www.integrofuels.com/index.html>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

IPT. **Tutorials of the industrial combustion course**. 2007. Disponível em: <http://www.ipt.br/artigo_tecnico/3.htm>. Acesso em 25 mar. 2018.

IRIYA, H. K.; OLIVEIRA, C. M.; BERTO, A. R. Setor sucro-alcooleiro: análise das exportações brasileiras. **Revista de Ciências Empresariais**, Umuarama, v.2, n. 4, p. 1-11, jun. 2009. Disponível em: <http://web.unifil.br/docs/empresarial/4/setor_sucroalcooleiro.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JR T. R.; MILES, T.R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**. v. 54, n. 1-3, p. 17-46, mar. 1998. Disponível em: <https://ac.els-cdn.com/S0378382097000593/1-s2.0-S0378382097000593-main.pdf?_tid=504c5389-dd1a-4e8a-ab8b-62cb25b5e439&acdnat=1535554657_b0adad60abf8e977f36e03940b3ff4f7>. Acesso em: 25 mar. 2018.

KARAMARKOVIC, R.; KARAMARKOVIC, V. Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures, **Energy**, Dositejeva, v. 35, n. 2, p. 537-549, fev. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544209004551>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

KOUKIOS, E. G. Progress in thermochemical, solid-state refining of biofuels: from research to commercialisation. **Advances in Thermochemical Biomass conversion**, Zografou, v. 2, p.

1678-1692, jan. 1993. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-1336-6_136>. Acesso em: 25 mar. 2018.

KRASNOSCHIOKOV, E. A.; SUKOMIEL, A. S. Termotransferencia. In: KRASNOSCHIOKOV, E. A. **Problemas de Termotransferencia**. Moscou, MIR, 1977. v. 2, cap. 4, p. 115,135. Disponível em: <https://www.gfxfile.com/4bx/problemas_de_termotransferencia_archivo1.zip>. Acesso em: 25 mar. 2018.

KUNTAL, J.; SUDIPTA, D. Biomass integrated gasification combined cogeneration with or without CO₂ capture – A comparative thermodynamic study. **Renewable Energy**, Kolkata, v. 72, p. 243-252, dez. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114004133>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

LARSON, E. D.; WILLIAMS, R. H.; REGIS, M.; LEAL, L. V. A review of biomass integrated gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries with an analysis for Cuba. **Energy for Sustainable Development**, Princeton, v. 5, n.1, p. 54-76, mar. 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082609600211>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

LIPINSKI et al. Enhanced wood fuels via torrefaction. **Fuel Chemistry Preprints**, Worthington, v. 47, n.1, p.169-171, set.2002. Disponível em: <https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/47_1_Orlando_03-02_0071.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

LOPES SILVA, D. A.; DELAI, I.; DELGADO MONTES, M. L.; ROBERTO OMETTO, A. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, São Carlos, v. 32, p. 532-547, abr. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000276>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

MACHIN, E. B. **Análise técnica, econômica e ecológica da incorporação de sistemas de gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro: uso de ciclos combinados para o aumento da oferta de eletricidade**. 2015. 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/124515>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; CARVALHO JR., J. A. Energetic valorization of waste tires. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Guaratinguetá. v. 68, n. 1, p. 306-315, fev. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306074>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; SILVEIRA, J. L.; PROENZA, N. P.; BRAGA, L. B. Technical assessment of the Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine Combined Cycle (BIG-GTCC) incorporation in the sugarcane industry. **Renewable Energy**, Guaratinguetá, v. 114, p. 464-479, dez. 2014. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117306511>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

MARSH, K. N. Problems due to the effect of pressure and dissolved gases on the density of water. In: MARSH, K. N. **Recommended reference materials for the realization of physicochemical properties**, Oxford: Blackwell, 1987, v. 2, cap. 3, p. 3-6. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/book/9780080210179/recommended-reference-materials-for-realization-of-physicochemical-properties#book-description>>. Acesso em 25 mar. 2018.

MILES, T. R.; MILES JR., T. R.; BAXTER, L.; BRYERS, R. W.; JENKINS, L. L.

Alkali deposits found in biomass power plants. A preliminary investigation of their extend and nature, **Revista**, Oak Ridge, v. 2, n. 1, p. 96-8225, fev. 1996. Disponível em:

<<https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy96/8142v1.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

NATARAJAN, E.; OHMAN, M.; GABRA, A.; NORDIN, T.; LILIEDAHL, A. N. Experimental determination of bed agglomeration tendencies of some common agricultural residues in fluidized bed combustion and gasification. **Biomass Bioenergy**, Madras, v. 15, n. 2, p. 163-169, ago.1998. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953498000154>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

OLIVARES, A.; AZNAR, M. P.; CABALLERO, M. A.; GIL, J.; FRANCES, E.; CORELLA, J. Biomass gasification: produced gas upgrading by in-bed use of dolomite. **Industrial Engineering Chemical Residues**, Madrid, v. 36, n. 12, dez. 1997, p. 5220-5226. Disponível em:

<<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie9703797>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

OIL-PRICE. **Preço do petróleo, petróleo e energia**. Disponível em: <<http://oil-price.net/index.php?lang=pt>>. Acesso em: 04 dez. 2017.

OLIVARES, G. E.; CORTEZ, B. L. A.; LORA, S. E.; SANCHEZ, G. C.; BAUEN, A. Preliminary tests with a sugarcane bagasse fueled fluidized-bed air gasifier. **Energy Conversion and Managemen**, Campinas, v. 40, n. 2, p. 205-214, jan. 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000405>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PEDROSO, D. T.; KALTSCHMITT, M. Dichrostachys cinerea as possible energy crop facts. **Biomass Conversion and Biorefinery**, Madrid, v. 2, n. 1, p. 41-51, jan. 2012. Disponível em: <<https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1020079935>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PEDROSO, D. T.; MACHIN, E. B.; SILVEIRA, J. L.; NEMOTO, Y. Experimental Study of Bottom feed updraft Gasifier. **Renewable Energy**, Guaratinguetá, v. 57, n. 1, p. 311-316, set. 2013. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113000955>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PELLEGRINI L. F.; OLIVEIRA JUNIOR, S. Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification. **Energy**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 314-327, abr. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544206002064>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PEREZ, M.; CHAALA, A.; ROY, C. Co-pyrolysis of sugarcane bagasse with petroleum residue. Part II. Product yields and properties, **Fuel**, Quebec, n.7, v.81, p. 893-907. mai-2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236101002150>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PIMCHUAI, A.; DUTTA, A.; BASU, P. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energy Fuels**, Muang, v. 24, n. 9, p. 4638 – 4645, fev. 2010. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef901168f>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

REIN, P. Filtration. In: REIN, P. **Cane sugar engineering**. Berlim: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007, v. 2, cap. 11, p. 768-793. Disponível em: <<https://www.bartens.com/book/cane-sugar-engineering/>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PRINS, M.; PTASINSKI, K.; JANSEEN, F. More efficient biomass gasification via torrefaction. **Energy**, Eindhoven, v. 31, n. 15, p. 3458-3470, dez. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544206000065>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PROENZA PÉREZ, N.; MACHIN, E. B; PEDROSO, D. T; ANTUNES, J. S, SILVEIRA, J. L. Fluid-dynamic assessment of sugarcane bagasse to use as feedstock in bubbling fluidized bed gasifiers. **Applied Thermal Engineering**, Guaratinguetá, v. 73, n. 1, p. 238-244, dez. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114006243>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

PUIG-ARNAVAT, M.; BRUNO, J. C.; CORONAS, A. Review and analysis of biomass gasification models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Tarragona, v. 14, n. 9, p. 2841–2851, dez. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002108>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

RAJ, N. T.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of renewable energy based cogeneration technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Chennai, v. 15, n. 8, p. 3640-3648, out. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111002346>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

REED, T.; BRYANT, B. Energy balance for biomass densification. In: REED, T. **Densified biomass: a new form of solid fuel**. Colorado: Solar energy research institute, 1978 v. 35, cap. 3, p. 75-83. Disponível em: <https://play.google.com/books/reader?id=gAImWn4WiUkC&hl=pt_BR&pg=GBS.PA17>. Acesso em: 25 mar. 2018.

REED T. B.; DAS, A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. **The Biomass Energy Foundation Press**. Golden, v. 1, n. 1, p. 122-140, mar. 1998. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3022.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

SÁNCHEZ, C. G.; SILVA, E.; GOMES, E. O. Gaseificação. In: **Biomassa para Energia**. Campinas, v. 1, n.1, p. 284-368, fev. 2008. Disponível em: <<https://www.nipe.unicamp.br/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

SÁNCHEZ PRIETO, M. G. S.; NEBRA, S. A. Análise do custo exergetico do sistema de cogeração de uma usina sucro-alcooleira, CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2001, Goiania. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Goiania: CONEMI, 2001. Disponível em: <<http://conemi.org.br/xvi/certificados/anais-do-xvi-conemi>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

SILVEIRA, J. L.; CARVALHO JUNIOR, J. A.; VILLELA, I. A. C. Combined cycle versus one thousand diesel power plants: pollutant emissions, ecological efficiency and economic analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Guaratinguetá, v. 11, n. 3, p. 524-535, abr. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000432>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

SKOULOVA, V.; MARIOLISB, N.; ZANAKISB, G.; ZABANIOTOUA, A. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Thessaloniki, v. 15, n. 4, p. 1928-1936, mai. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004545>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

UNITED NATIONS. **Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change**, 1998.

VAN DE BELD, L.; WAGENAAR, B.M.; PRINS, W. Cleaning of hot producer gas in a catalytic adiabatic packed bed reactor with periodic flow reversal. In: BRIDGWATER, A.V.; BOOCOOCK, D. G. B. (Ed.). **Developments in thermochemical biomass conversion**. Dordrecht: Springer, 1997. p. 907-920. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-1559-6_73>. Acesso em: 25 mar. 2018.

VASCONCELOS, Y. Não sobra nem o bagaço. 2003. **Revista Pesquisa Fapesp**, São Paulo, v. 77, n.1, p. 66-70, jul. 2002. Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2002/07/66_combust%C3%ADvel.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

VREUGDENHIL, B. J.; VAN DER DRIFT, A.; VAN DER MEIJDEN, C. M. Co-gasification of biomass and lignite in the indirect gasifier Milena. IN PROCEEDING OF PITTSBURGH COAL CONFERENCE, 20, 2009, Pittsburgh. ECN, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Berend_Vreugdenhil/publication/264857397_Co_gasification_of_biomass_and_lignite/links/5411b1690cf264cee28b50f1/Co-gasification-of-biomass-and-lignite.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

WILLIAMS, R. H. Biomass gasifier gas turbine power generating technology. **Biomass and Bioenergy**, Princeton, v. 10, n. 2, p. 149-166, fev. 1996. Disponível em:

< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953495000690>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

WORLEY, M.; YALE, J. Biomass gasification technology assessment. **Consolidated Report 2012**, Georgia, v.1, n.1, p. 1-358, nov. 2012. Disponível em:

< <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57085.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

YOUNG-IL, S; SANG, J. Y.; YONG, K. K.; JAE-GOO, L. Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier. **Biomass and Bioenergy**, Yuseong-gu, v. 35, n. 3, p. 59-73, out. 2011. Disponível em:

< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341100403>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

ZAINAL, A. Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Nibong Tebal, v. 114, n. 9, p. 2852-2862, dez. 2010. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002066>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

ZANZI, R.; TITO FERRO, D.; TORRES, A.; BEATON, P. Biomass torrefaction. In.: WORLD CONF. AND TECHNOLOGY EXHIBITION ON BIOMASS FOR ENERGY, 14., 2004, Rome. **Proceedings...** Rome: Industry and Climate Protection, 2004. Disponível em:

<<http://new.etaflorence.it/proceedings/2nd-world-conf-and-tech-exhibit-on-biomass-for-energy-industry-and-climate-protection/>>. Acesso em: 25 mar. 2018.