

JEFFERSON JOEICEMIR DA SILVA

**“TECNOLOGIAS EFICIENTES PARA COGERAÇÃO NO SETOR
SUCROALCOOLEIRO: SISTEMAS RANKINE & CICLOS COMBINADOS COM
GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO”**

**Monografia apresentada ao Programa
de Educação Continuada da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Especialista em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência
Energética.**

Área de concentração:
Cogeração de eletricidade

Orientadora:
Prof. Suani T Coelho, Ph.D.

Apresentado por:
Da Silva, Jefferson Joeicemir

São Paulo
2018

JEFFERSON JOEICEMIR DA SILVA

**“TECNOLOGIAS EFICIENTES PARA COGERAÇÃO NO SETOR
SUCROALCOOLEIRO: SISTEMAS RANKINE & CICLOS COMBINADOS COM
GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO”**

**Monografia apresentada ao Programa
de Educação Continuada da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Especialista em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência
Energética.**

Apresentado por:
Da Silva, Jefferson Joeicemir

São Paulo
2018

JEFFERSON JOEICEMIR DA SILVA

**“TECNOLOGIAS EFICIENTES PARA COGERAÇÃO NO SETOR
SUCROALCOOLEIRO: SISTEMAS RANKINE & CICLOS COMBINADOS COM
GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO”**

**Monografia apresentada ao Programa
de Educação Continuada da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Especialista em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência
Energética.**

Área de concentração:
Cogeração de eletricidade

Orientadora:
Prof. Suani T Coelho, Ph.D.

Apresentado por:
Da Silva, Jefferson Joeicemir

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

DA SILVA, JEFFERSON JOEICEMIR
TECNOLOGIAS EFICIENTES PARA COGERAÇÃO NO SETOR
SUCROALCOOLEIRO: SISTEMAS RANKINE & CICLOS COMBINADOS
COM GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO / J. J. DA SILVA -- São Paulo, 2018.
93p. p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.COGERAÇÃO NO SETOR SUCROALCOOLEIRO 2.GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO 3.SISTEMAS RANKINE & CICLOS COMBINADOS 4.EFICIENCIA I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

AGADECIMENTOS

Obrigado a:

Prof. Suani T Coelho, Ph.D.

Minha esposa e meu filho,

Meus pais e irmãos,

Deus

EPÍGRAFE

"You don't know what you really don't know until you know that you didn't know it"

Sócrates

RESUMO

A população mundial aumenta continuamente, com um consumo de energia cada vez maior. Esta situação, como mencionado por Simões Moreira (2017) não pode perdurar, não apenas devido à exaustão das reservas no planeta como também aos impactos ambientais correspondentes. REN 21 (2018) indica que o consumo mundial de combustíveis fósseis cresceu entre 1994 e 2014 a um ritmo de 2% ao ano, número este que aumentou para 3.1% no período de 2014 a 2016. Infelizmente o mundo segue aumentando a sua dependência dos combustíveis fósseis. Goldemberg & Lucon (2006-2007) ajudam a entender as razões por trás deste fato como oriundas de pelo menos dois aspectos: o primeiro se refere ao aumento da população mundial, que cresceu de 2,5 bilhões em 1950 e para 7,15 bilhões em 2016, ou seja, mais de 5,1 milhões de pessoas em apenas 67 anos, ou mais que o dobro do que toda a quantidade que populou o planeta em qualquer momento de sua história em tão curto espaço de tempo. Em segundo lugar, isto se agrava pelo fato de que o homem primitivo consumia em média $2,3 \cdot 10^3$ kcal/dia de energia, enquanto o homem atual consome cerca de 100 vezes isto, $230 \cdot 10^3$ kcal/dia. Os dois efeitos em conjunto alertam que a sociedade global já se encontra em um contexto no qual a revolução na maneira de produzir, consumir e comercializar energia é algo quase que obrigatório para a própria existência de vida no planeta terra.

Como consequência, o setor de produção, distribuição, comercialização e consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo vem passando pelo que diversos autores denominam não simplesmente de evolução, mas de revolução, pois os processos tradicionais estão sendo questionados e revistos mundialmente.

Com a cogeração de energia nas usinas de açúcar e álcool no Brasil – tanto para consumo próprio como para a venda de excedentes - não há de ser diferente. Um setor que historicamente sempre esteve acompanhando esta tendência e recebendo investimentos como fonte de energia renovável, vem passando por uma perda de investimentos e de espaço e na matriz energética. Assim sendo, o sucesso da estratégia de comercialização de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro das últimas décadas, passa a não necessariamente garantir a presença na matriz energética do futuro.

O presente trabalho analisa as opções tecnológicas mais eficientes para geração de energia nas usinas sucro-alcooleiras. Analisa-se as opções de sistemas a vapor mais eficientes, com caldeiras de alta pressão; e também a gaseificação de bagaço para uso em ciclo combinado, o que é uma alternativa mais eficiente que, apesar de estudada há quase trinta anos e ainda apresentar dificuldades tecnológicas a serem resolvidas, continua sendo uma proposta inovadora para o setor sucroalcooleiro.

As conclusões obtidas mostram que a quantidade de energia elétrica excedente produzida em uma cogeração tradicional a vapor nas usinas de açúcar e álcool varia entre cerca de 23 kWh/tcm (quilowatt hora por tonelada de cana moída) a 130 kWh/tcm, ou seja, pode atingir mais de 5,5 vezes, dependendo da seleção dos equipamentos, configuração do sistema e grau de consumo de vapor no processo. Além disto, com a gaseificação de bagaço e uso do gás de síntese em ciclo combinado, verifica-se um potencial em torno de 225 kWh/tcm ou praticamente o dobro em relação aos métodos tradicionais. Entretanto esta tecnologia ainda encontra-se em fase de desenvolvimento e enfrenta desafios a serem resolvidos, como o método mais adequado de limpeza dos gases, de forma a se utilizar uma turbina a gás. O trabalho analisa também as lições aprendidas e discute as questões a serem enfrentadas como proposta de continuidade.

ABSTRACT

The world population grows continuously consuming more energy per capita. A situation that, as mentioned by Simões Moreira (2017) cannot last because of its planet reserves exhaustion and environmental impacts. REN 21 (2018) indicated that world consumption of fossil fuels grew between 1994 and 2014 at a rate of 2% per year, a number that jumped to 3.1% in the period 2014 to 2016. Unfortunately, the world is increasing its fossil fuels dependence. Goldemberg & Lucon (2006-2007) helps us to understand the reasons behind as its coming from at least two aspects: first, the increase in the world population, as it was from 2.5 billion in 1950 to 7.15 billion in 2016, that is, more than 5.1 million people in just 67 years, or in other words, more than twice as much as the entire amount that populated the planet at any time in its history in such a short space of time. Second, this is aggravated by the fact that primitive man consumed on average 2.3 10³ Kcal / day of energy, while the actual man consumes about 100 times that, 230 10³ Kcal / day. The two effects together reflects how much our society is already in context where its call for a revolution in the way we produce, consume, and trade energy for life's existence on Earth.

As consequence, the production, distribution, commercialization and consumption of electric energy in Brazil and in the world has been going through what many authors call not simply evolution, but revolution; Traditional ways are today questioned and revised worldwide. With cogeneration of energy for own consumption or surplus sales in the sugar and ethanol sector it is not different, an industry that has historically been following this trend and receiving investments as a renewable energy source, it is now losing space in the energy matrix. This means that, the successful strategy of commercialization of electric surplus of today, does not necessarily guarantee the presence in the future.

The present work focuses in co-generation efficiency within sugar mills. Steam cycles with low and high pressure boilers, as well as Gasifier combined cycle are studied; The first a consolidated technology and the second an alternative that despite being studied for almost thirty years, remains an innovative proposal to increase the potential co-generation efficiency level in sugar mills even further.

The obtained conclusions show that the amount of surplus electricity produced in traditional steam cogeneration in sugar and alcohol mills sites ranges from about 23 kWh / tcm (kilowatt hour per ton of sugar cane processed) to 130 kWh / tcm, that is, more of 5.5 times depending on equipment selection, system configuration and degree of steam consumption in the process. In addition, with gasified combined cycle there is potential to exceed 225 kWh / tcm or practically twice as much as

the traditional methods can offer. However, this last technology is still under development and faces challenges and issues, such as achieving the proper cleaning method if a gas turbine is used or the most suitable type of gasifier. The work ends with some gasified systems lessons learned and issues to be addressed as a proposal of continuity.

LISTA DE FIGURAS OU ILUSTRAÇÕES

Número	Descrição	Página
4.1.1 -	Estimativa do consumo diário de energia per capita	6
4.1.2 -	Estimativa do consumo energético mundial em 2015, 100%≈367 exajoules	7
4.1.3 -	Estimativa do consumo energético mundial em 2016, 100%≈374 exajoules	7
4.1.4 -	Crescimento global por fonte versus o consumo de energia	8
4.1.5 -	Capacidade global instalada de energia elétrica por fonte renovável	8
4.1.6 -	Participação das fontes renováveis na produção global de eletricidade, final de 2016, 100%≈8.233GW	9
4.1.7 -	Participação das fontes renováveis na produção global de eletricidade, final de 2017, 100%≈8.283GW	9
4.1.8 -	Potência elétrica instalada empreendimentos em operação, 2017	10
4.1.9 -	Potência elétrica instalada empreendimentos em operação 2018	10
4.2.1 -	Geração mensal de bioeletricidade sucroenergética para a rede, 2017 [GWh]	15
4.2.2 -	Evolução anual de capacidade instalada a partir de biomassa de cana de açúcar, período 2002 a 2019, Brasil [%]	17
4.2.3 -	Complementariedade eólica/ hídrica	17
4.2.4 -	Capacidade instalada de energia eólica [MW]	18
4.2.5 -	Geração global de eletricidade em 1980	19
4.2.6 -	Geração global de eletricidade em 2014	19
4.3.1 -	Processo de cogeração em uma usina de açúcar e álcool	21
4.3.2 -	Representação esquemática do ciclo Rankine ideal	23
4.3.3 -	Esquema simplificado de cogeração utilizando turbina do tipo condensação-extração	23
4.4.1 -	Configuração típica em uma usina sucroalcooleira	26
4.4.2 -	Configuração dos ciclos térmicos nas usinas antigas e modernas	29
4.4.3 -	Configuração com turbina extração/ condensação	30
4.5.1 -	Produtos possíveis de serem obtidos a partir do syngas	35
4.6.1 -	Intervalo de potências dos gaseificadores	41
4.6.2 -	Critérios mínimos para seleção de um gaseificador	42
4.7.1 -	Representação esquemática do ciclo Brayton simples	46
4.7.2 -	Rendimento térmico de uma turbina a gás (curva superior) e trabalho específico (curva inferior) em função da taxa de compressão.	47

4.7.3 -	Exemplo de ciclo combinado Brayton-Rankine	48
5.1.1 -	Experiência internacional em gaseificação	53
5.1.2 -	Experiência internacional: matérias primas e tecnologia de gaseificação	53
5.1.3 -	Aplicações do gás de biomassa	54
5.1.4 -	Fluxograma da planta de gaseificação de Güssing, Austria 2018	55
5.1.5 -	Distribuição geográfica das plantas de gaseificação de biomassa	55
5.1.6 -	Processo de preparação da biomassa	56
5.1.7(a) -	Limpeza por resfriamento e secagem do gás/leito fixo/ pequena escala	57
5.1.7(b) -	Limpeza por remoção catalítica	57
5.1.7 (c) -	Limpeza do gás quente/ tipicamente aplicações pressurizadas	57
8.1.1 -	Matriz energética nacional por fonte de combustível	62
8.2.1 -	Processo de torrefação como pré-tratamento da gaseificação	63
8.2.2 -	Resultados dos experimentos de torrefação do bagaço da cana	63
8.3.1 -	Gaseificação em ciclo combinado com gaseificador por fluxo de arraste	65
8.7.1 -	Diagrama de processo proposto para o projeto Olokele/G&R Havaí	73

LISTA DE TABELAS

Número	Descrição	Página
4.1.1 -	Cenário atual do consumo mundial e nacional de energia	11
4.2.1 -	Vantagens da cogeração das usinas de açúcar e álcool	16
4.2.2 -	Dificuldades e desafios da cogeração nas usinas de açúcar e álcool	19
4.3.1 -	Classificação das usinas conforme a capacidade de moagem	23
4.3.2 -	Índices típicos do setor por Coelho	24
4.3.3 -	Índices típicos do setor por Machin	25
4.3.4 -	Valores típicos do setor por Santos	25
4.4.1 -	Resumo do resultado da eficiência com diversas configurações	32
4.4.2 -	Medidas para aumento da quantidade excedente de energia mantido o vapor como combustível	33
4.5.1 -	Exemplos de consumo energético para produção de gás síntese	35
4.5.2 -	Características do gás de síntese para uso em motores a combustão interna	37
4.6.1 -	Gaseificadores de leito fixo	38
4.6.2 -	Gaseificadores de leito fluidizado	39
4.6.3 -	Gaseificadores por fluxo de arraste	40
4.6.4 -	Intervalo típico de composição dos gases conforme o gaseificador	41
4.8.1 -	Eficiências esperadas em sistemas de gaseificação para diferentes tipos de gaseificadores	49
5.1.1 -	As maiores plantas com gaseificação em operação no mundo	52
5.1.2 -	Resumo das características comuns a diversas aplicações	57
5.1.3 -	Lições aprendidas nas plantas de gaseificação em operação	58
8.2.1 -	Torrefação de bagaço a 250°C (523K)	64
8.4.1 -	Dados padrões para o cálculo da eficiência como sistema gaseificado em ciclo combinado	67
8.5.1 -	Cálculos dos valores dos parâmetros termodinâmicos, ciclo-combinado com gaseificação	68
8.6.1 -	Lista de plantas CHP no mundo	69
8.7.1 -	Condições de operação projeto Olekele/G&R	73
8.7.2 -	Dados esperados de desempenho no projeto Olekele/G&R	74

LISTA DE ABEVIATURAS E SIGLAS

Termo	Significado
ABRACEL	Associação brasileira de comercialização de energia
ACL	Ambiente de contratação livre, também chamado de mercado livre
ACR	Ambiente de contratação regulada
ATR	Índice de açúcares recuperáveis
CCEE	Câmara de comércio de energia elétrica
CEST	Condensing extraction steam turbine, turbina extração-condensação ou turbina mista
CGH	Central Gerador Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undielétrica
CHP	Combined heat and power
EOL	Central Geradora eólica
EPE	Empresa de pesquisa energética do governo federal
FIFCB	Fast Internal Circulating fluidized gasifier
FT	Fischer Tropisch
h	Entalpia kJ/kg
HRSG	Heat recovery steam generator – caldeira de recuperação
UHE	Usina hidrelétrica
ÚNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
IGCC	Integrated gasification combined cycle – Ciclo combinado de gaseificação
MCI	Motor de combustão interna
MME	Ministério de minas e energia
PCH	Pequenas Centrais hidrelétricas
Q _{in}	Calor adicionado
Q _{out}	Calor rejeitado
SIN	Sistema Interligado nacional
STIG	Steam injected gas turbine (turbina a gás com injeção de vapor)
Syngas	Synthesis gas (gás de síntese)
T _{cm}	Tonelada de cana moída
TFEC	Total Final Energy Consumption (energia total final consumida)
t/ha	Tonelada por hectare
UFV	Central geradora fotovoltaica

UTE	Usina Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear
kWh	Quilowatt hora
Wt	Trabalho da turbina

SUMÁRIO

AGADECIMENTOS	V
EPÍGRAFE	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS OU ILUSTRAÇÕES.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE ABEVIATURAS E SIGLAS	XIV
1.0 OBJETIVO DO TRABALHO E METODOLOGIA UTILIZADA	2
1.1. OBJETIVOS	2
1.2 METODOLOGIA.....	3
2.0 SITUAÇÃO ATUAL DE ENERGIA NO MUNDO E NO BRASIL	5
2.1 CONSUMO E PERSPECTIVAS.....	5
3.0 O SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL	12
3.1 HISTÓRICO DE PRODUÇÃO E SEU CONTEXTO ATUAL	12
3.2 A COGERAÇÃO A VAPOR NAS USINAS DE CANA DE AÇÚCAR.	20
3.3 A ABORDAGEM ATUAL QUANTO A EFICIÊNCIA	25
4.0 TECNOLOGIAS MAIS EFICIENTES EM DESENVOLVIMENTO	33
4.1 DEFINIÇÃO DE GASEIFICAÇÃO	33
4.2 TIPOS DE GASEIFICADORES.....	37
4.3 CICLO BRAYTON E CICLO COMBINADO	44
4.4 EFICIÊNCIAS DO CICLO COMBINADO COM GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO	49
5.0 EXPERIÊNCIAS EXISTENTES E LIÇÕES APRENDIDAS COM A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA....	50
5.1 SITUAÇÃO ATUAL – LIÇÕES APRENDIDAS.....	50
6.0 CONCLUSÕES	59
7.0 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	61
8.0 APÊNDICE	62
8.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	62
8.2 PRÉ-TRATAMENTO DE TORREFAÇÃO PARA GASEIFICAÇÃO POR FLUXO DE ARRASTE.	62
8.3 UM CICLO COMBINADO DE TESTE	65
8.4 METODOLOGIA PARA ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA	67
8.5 CÁLCULO DA POTÊNCIA OBTIDA NO CICLO COMBINADO GASEIFICADO	68
8.6 LISTA DE REFERÊNCIA DE PLANTAS CHIP - IEA	69
8.7 EXPERIÊNCIA OLOKELE/G&R HAVAÍ.....	71
9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1.0 OBJETIVO DO TRABALHO E METODOLOGIA UTILIZADA

1.1. Objetivos

Com este trabalho busca-se fundamentalmente avaliar dois aspectos em relação a cogeração de energia no setor sucroalcooleiro. O primeiro trata-se das práticas correntes de se obter com ciclos a vapor com mais eficiência ou kWh (quilowatt hora) por tcm (tonelada de cana moída). O segundo é estudar as lições aprendidas em caso de utilização de gaseificação do bagaço de cana de açúcar em ciclo combinado.

São cobertos aspectos como:

- a) Panorama do consumo energético mundial e nacional;
- b) O histórico da cana de açúcar no Brasil e a produção de energia a partir do bagaço;
- c) Vantagens da cogeração no setor sucroalcooleiro;
- d) Dificuldades técnicas e desafios mercadológicos da comercialização do excedente de energia;
- e) Processo atual de cogeração com ciclos a vapor;
- f) Características fundamentais do bagaço e palha;
- g) Configurações típicas com ciclos a vapor;
- h) Ações de melhoria de eficiência praticadas no setor sucroalcooleiro e respectivos níveis médios de eficiências atingidos;
- i) A gaseificação do bagaço de cana de açúcar;
- j) O gaseificador, suas características, alguns dos critérios de seleção;
- k) Histórico e aplicações de gaseificação;
- l) Algumas lições aprendidas com casos de sucessos e insucessos;

Não se inclui no presente estudo uma análise conjuntural, ou seja, itens como aspectos ambientais, econômicos, conjunturais e perspectiva política ou arcabouço legal. O trabalho se concentra no conteúdo tecnológico, com a exploração dos exemplos encontrados na bibliografia pesquisada.

Com isto busca-se incitar iniciativas e estudos de aprofundamento focando a melhoria na eficiência das plantas de cogeração das usinas de açúcar e álcool, no sentido de tornar a energia produzida no setor mais competitiva e menos agressiva ao meio ambiente de maneira que esta possa retomar e potencialmente até ultrapassar os níveis de investimentos das décadas passadas.

1.2 Metodologia

O trabalho estruturado tendo como base a leitura de artigos, e dissertações adicionado da entrevista com profissionais a respeito do tema. Se inicia com uma revisão do consumo mundial e nacional de energia, explora o histórico de comercialização de excedente de energia no setor sucroalcooleiro, o método tradicional com ciclo a vapor e as iniciativas atuais de melhoria na eficiência ou quantidade de energia produzida (kWh) por tonelada de cana moída (tcm), adentrando na sequência no tema da gaseificação, aonde se se revisa a definição, os tipos de gaseificadores e alguns critérios de seleção. Após isto se aborda ciclo-combinado e eficiência esperadas caso se implemente uma cogeração a gás nas usinas de açúcar e álcool. Na última parte do trabalho alguns exemplos de plantas ao redor do mundo são analisados a partir da onde se elabora uma lista de lições aprendidas e proposta de continuidade para os desafios do tema.

No subitem 4.1 a partir principalmente de informações coletadas no REN 21 (2018) e na ANEEL (2018) se elabora um quadro resumo do panorama de consumo mundial e nacional de energia, primeiro de uma forma geral, depois especificamente de eletricidade. Neste trecho se observa por exemplo o crescimento da população e consumo de energia derivada de petróleo, entretanto com a notícia de que a maioria dos projetos novos implementados no setor elétrico entre 2017 e 2018 fazem uso de combustíveis renováveis.

No subitem 4.2 é realizada uma leitura do contexto histórico de produção de energia nas usinas de açúcar e álcool, verificando algumas das vantagens e dos desafios atuais na comercialização de excedente de energia elétrica. O item 4.3 engloba aspectos como uma visão geral do processo de cogeração nas usinas a partir do recebimento da cana até a produção de energia elétrica ou térmica, apresenta um exemplo de configuração e se encerra com alguns valores típicos de produtividade e índices físico-químicos utilizados como referência no setor.

No subitem 4.4 são elencadas as práticas atuais de melhoria de eficiência no setor relacionando os potenciais de ganho que chegam a quase 6,0 dependendo da configuração e dos equipamentos utilizados, podendo chegar a quase 11,00 caso seja possível empregar palhas e pontas além do bagaço, são mencionados e observados aspectos como emprego do ciclo Rankine, turbinas de extração-condensação, eletrificação do preparo, entre outros.

Na sequência o subitem 4.5 revisa as várias definições do conceito de gaseificação, observa a variedade de uso, e apresenta a equação básica ao se empregar bagaço de cana de açúcar como combustível. Já o 4.6 trata dos principais tipos de gaseificadores e algumas de suas características, bem como principais critérios de seleção e alguns dos cuidados quanto a limpeza ou purificação do

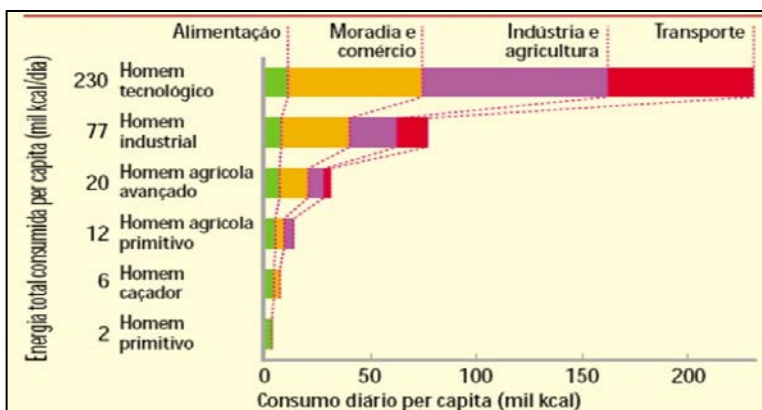
gás, seja ele aplicado a motor de combustão interna ou com turbina. O 4.7 trata da turbina a gás tipo heavy duty ou aeroderivada, de ciclo Brayton e de ciclo-combinado. 4.8 avalia os ganhos potenciais do emprego do processo de gaseificação do bagaço de cana de açúcar. E finalmente um panorama das plantas de cogeração a partir da biomassa, em conjunto com alguns das lições aprendidas fazem parte do quadro resumo na parte final do trabalho.

2.0 SITUAÇÃO ATUAL DE ENERGIA NO MUNDO E NO BRASIL

2.1 Consumo e perspectivas

Em termos históricos, Goldemberg & Lincon (2006-2007) estimam que o homem tecnológico, vivendo no planeta terra a partir de 1970, consome em média 230 mil Kcal/dia, enquanto o homem primitivo que aqui esteve a cerca de 1 milhão de anos consumia menos de 2 mil Kcal/dia, ou seja, nos tempos atuais cada indivíduo consome mais do que 100 vezes a quantidade de energia que outrora consumia. A figura 4.1.1 ilustra estes dados com um pouco mais de detalhes considerando o homem caçador como o habitante a cerca de 100.000 anos, o agrícola primitivo 5.000 anos, o avançado até 1.400 d.C., e o industrial entre 1875 e 1969. Para complementar o entendimento quanto ao consumo global de energia, vale levar em consideração que a população mundial saltou de 2,5 bilhões em 1950 e para 7.15 bilhões em 2017, ou seja, em 67 anos o acréscimo foi de mais de 5.1 milhões de pessoas, mais que o dobro do que toda a quantidade que populou o planeta em qualquer momento de sua história. Definitivamente somos mais pessoas e consumimos mais, o que tem fomentado globalmente há décadas as discussões quanto ao uso racional e as fontes renováveis de energia.

Figura 4.1.1 Estimativa do consumo diário per capita de energia.

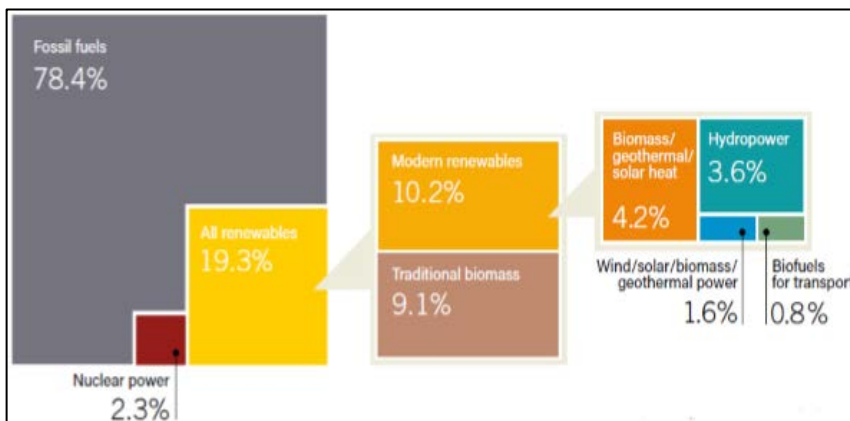


Fonte: Goldemberg & Lucon, 2006 -2007

Para avaliar como o homem tem tratado a redução de sua dependência de combustíveis fósseis nos valem das figuras 4.1.2 e 4.1.3 a seguir extraídas da REN 21 (2017) e REN 21 (2018). Uma primeira observação está no fato de que o crescimento no consumo global de energia em exajoule foi cerca de 1,9%, saindo dos 367 para 374. Entretanto, se observamos os combustíveis fósseis de maneira isolada o número saltou de aproximadamente 287,72 para 297,33 ou seja, 3.3%. No relatório REN 21 (2018) indica que o consumo mundial de combustíveis fósseis cresceu entre 1994 e 2014 a ritmo de 2% ao ano, número este número saltou para 3.2% no período de 2014 a 2016. A conclusão está em que a aproximadamente 25 anos se tinha um acréscimo de consumo de combustíveis fósseis de 2,0%

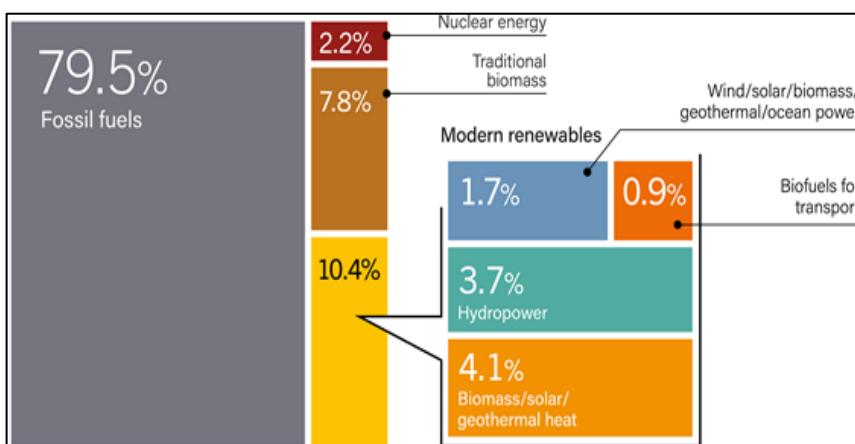
ao ano, o que saltou para 3,2% nos últimos 4 anos, ou seja, a sociedade ainda não iniciou seu processo de redução no consumo de combustíveis fósseis.

Figura 4.1.2 Estimativa do consumo energético mundial em 2015, 100% ≈ 367 exajoules



Fonte: REN 21 2017

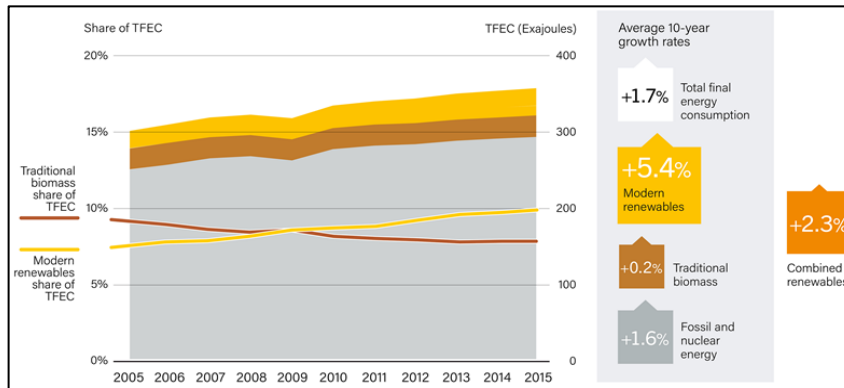
Figura 4.1.3 Estimativa do consumo energético mundial em 2016, 100% ≈ 374 exajoules



Fonte: REN 21 2018

Todavia nem todos os dados coletados são negativos, há de se notar nas figuras 4.1.2 e 4.1.3 acima que o consumo de biomassa tradicional (utilizada basicamente para cocção) foi reduzido, saindo dos 9.1% para 7.8% do volume. Além disso, a presença de energias renováveis saiu de 10.2 para 10.4%, dos aproximados 37,43 aos cerca de 38,89 exajoules, um acréscimo de 3,9% em um ano, o dobro do crescimento no consumo total de energia. Outro aspecto positivo está no fato de que conforme ilustrado na figura 4.1.4, se tomada uma perspectiva de 10 anos, entre 2005 e 2015, a participação do consumo de energia renovável cresceu 5,4%, enquanto de combustíveis fósseis somente 1,6%. No gráfico TFECE significa total final Energy consumption, ou em português, energia total final consumida. Isto significa que o acréscimo tem sido maior do consumo de combustíveis de origem renovável.

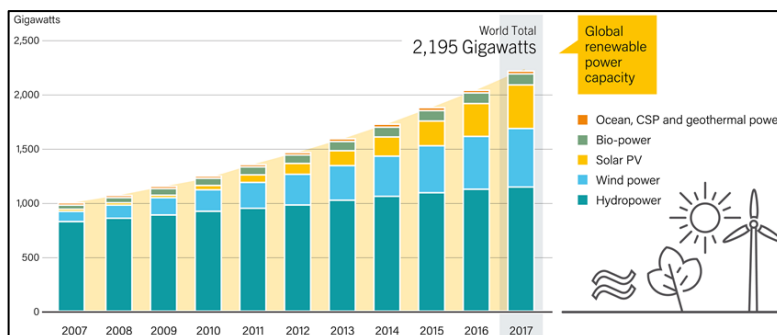
Figura 4.1.4: Crescimento global por fonte versus o consumo de energia



Fonte: REN 21 2018

Deixando de observar energia como um todo e iniciando com foco especificamente em eletricidade, REN 21 (2018) menciona que neste setor a transição para renováveis é a que está com maior aceleração, e que prova disso é o fato de que no ano de 2017 setenta por cento (70%) de toda a capacidade adicionada em GW (gigawatts) se deu a partir do uso de fonte renovável, a fonte solar sozinha teve mais potência instalada do que a soma de toda a geração adicional oriunda do carvão, gás natural e nuclear somadas. A figura 4.1.5 apresenta o comportamento de adição de energia elétrica por fonte renovável nos últimos 10 anos, aonde é possível se observar que entre 2007 e 2017 a capacidade instalada mais que dobrou.

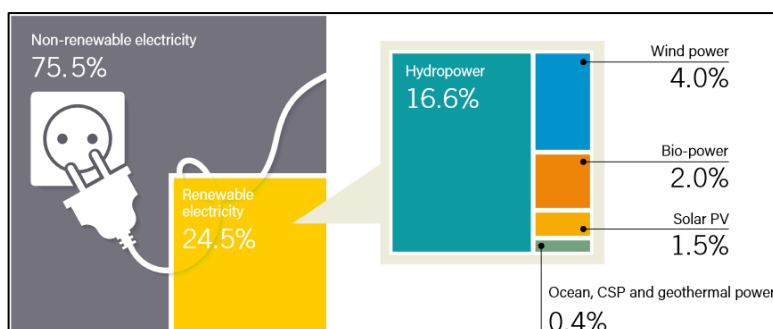
Figura 4.1.5 Capacidade global instalada de energia elétrica por fonte renovável.



Fonte: REN 21 2018.

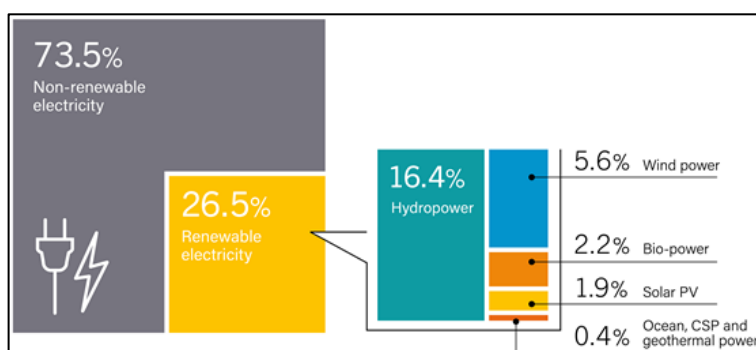
Embora de uma maneira geral o consumo de combustíveis fósseis é crescente, em eletricidade o cenário parece ser mais positivo. A figura 4.1.6 demonstra a participação das fontes renováveis em 2016 e a figura 4.1.7 trata os mesmos dados em 2017. É possível notar que não renováveis saiu de 75,5% ($\approx 6.216\text{GW}$) para 73,5% ($\approx 6.088\text{GW}$), ou seja, não houve somente adição de renováveis, mas como também o desligamento de plantas de geração movida a combustíveis fósseis ou carvão.

Figura 4.1.6 Participação das fontes renováveis na produção global de eletricidade, final de 2016, 100% ≈ 8.233 GW



Fonte: REN 21 2017

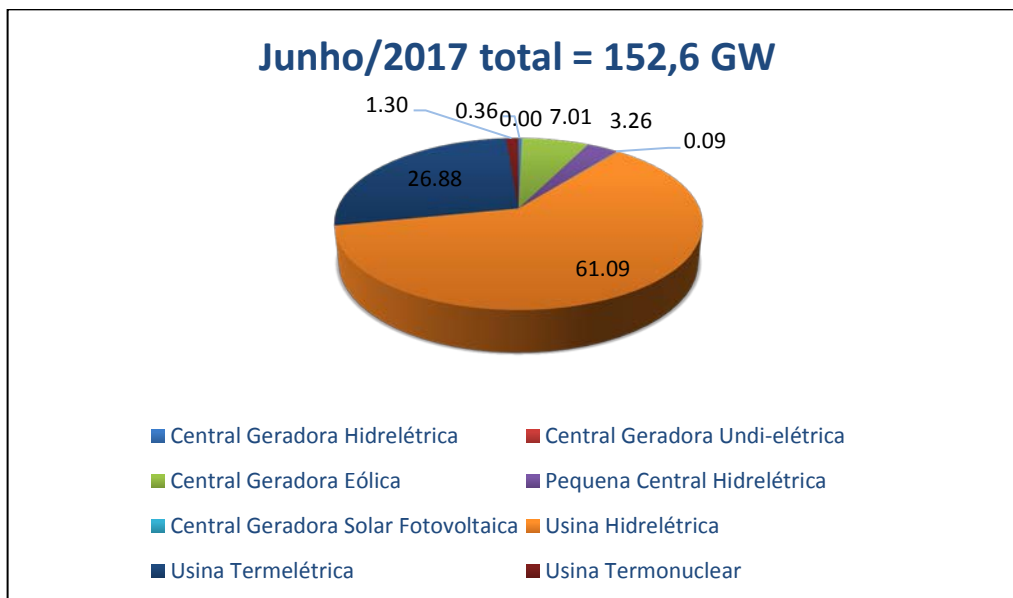
Figura 4.1.7 Participação das fontes renováveis na produção global de eletricidade, final de 2017, 100% ≈ 8283 GW



Fonte: REN 21 2018

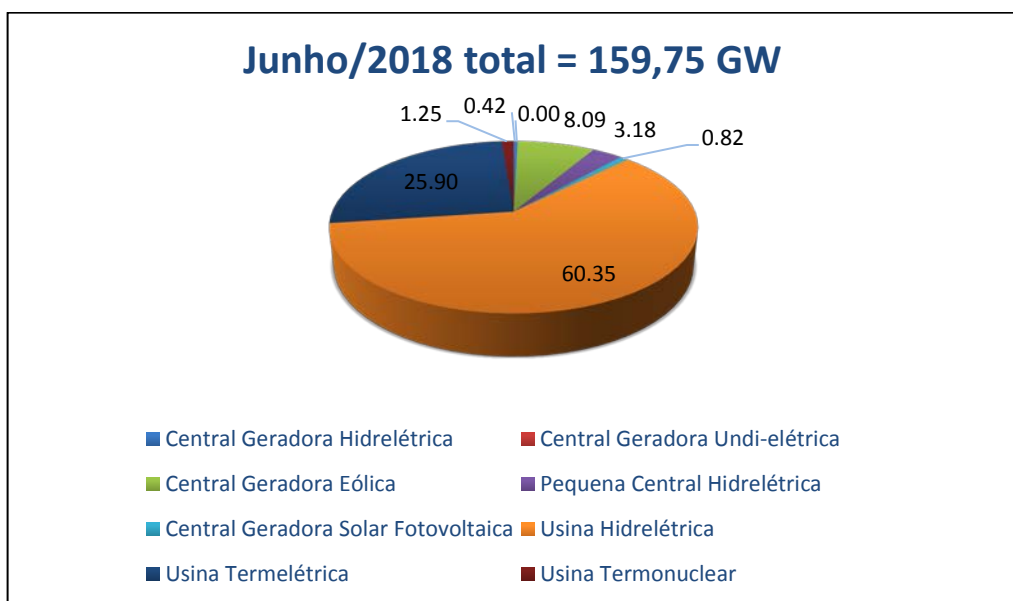
Voltando a análise ao Brasil, aqui a eletricidade nos anos de 2017 e 2018 (de Julho à Julho), como ilustram as figuras 4.18 e 4.1.9, houve um incremento de 4,6% no consumo de eletricidade, demandando os cerca de 160GW instalados. A título comparativo, neste mesmo período o acréscimo mundial foi de aproximadamente 1%, reforçando a observação feita por Goldemberg & Lincoln (2006-2007) de que os países em desenvolvimento seguem uma trajetória distinta das dos desenvolvidos, os primeiros devido ao aumento no acesso e os segundo à racionalidade do consumo. Além disto, o total de energia renovável saiu dos aproximados 109,6 GW (71,81%) para 116,4 GW (72,86%) ou seja 95% da potência adicional instalada (6,8/7,15GW) em 2017 foi a partir de fonte renovável, com destaque especial para um aumento de mais de oito vezes da base instalada em solar e mais de 20% em energia eólica no período. A produção de energia elétrica a partir de termelétricas por outro lado, passou por um incremento tímido de menos que 350MW ou 1%.

Figura 4.1.8 Potência elétrica instalada empreendimentos em operação, 2017



Fonte: Adaptada de ANEEL 2018

Figura 4.1.9 Potência elétrica instalada empreendimentos em operação, 2018



Fonte: Adaptada de ANEEL 2018

Um outro dado complementar, no item 8.1 do apêndice se encontra a matriz energética nacional segmentada por tipo de combustível ou origem, suas respectivas fontes, número de usinas e capacidade instalada, dados extraídos de ANEEL (2018). Neste quadro se observa que bagaço de cana tem a maior participação na matriz do ponto de vista da biomassa com 11.27 GW ou 6,7% do total, seguido por combustíveis de origem florestal como carvão vegetal, lenha, licor negro, entre outros com 3,16 GW ou 1,87%. Como já é quase que senso comum, a primeira posição na matriz como um todo pertence as hidroelétricas com 60,76%. Um dado um pouco curioso em um primeiro estante

está no fato que 2,4GW ou 1,4% aproximadamente constam como importados da Argentina e Venezuela.

A leitura deste subitem referente ao consumo mundial e nacional de energia permite inferir, entre outros aspectos, dos pontos apresentados no quadro resumo, tabela 4.1.1 a seguir.

Tabela 4.1.1 Quadro resumo, Cenário atual do consumo mundial e nacional de energia

Quadro resumo – Cenário atual do consumo mundial e nacional de energia
• Somos mais (7,5 bilhões de pessoas em 2017 versus 2,5 bilhões em 1950). • Consumimos mais (230 mil kcal/dia homem tecnológico versus 2 mil kcal/dia homem primitivo). • Crescimento do consumo global de energia de 1,9% contra um aumento de 3,3% do consumo de combustíveis fósseis entre 2017 e 2018. • Há uma redução no consumo mundial de biomassa tradicional de 9.1 para 7.8% da matriz, período 2015-2016. • Há um crescimento no consumo de renováveis na matriz de 10.2 a 10.4%, período de 2015-2016. • O crescimento médio nos últimos 10 anos (entre 2007 e 2017) do consumo de energia renovável foi em média de +5,4%, enquanto foi 1,6% para combustíveis fósseis.
Energia Elétrica
• Em 2017, 70% da capacidade instalada adicional a nível mundial foi utilizando fontes renováveis. No Brasil este percentual atingiu 95%. • A capacidade global de base instalada a partir de fonte renovável dobrou entre 2007 e 2017 atingindo aproximadamente 2.200 GW. • Houve desativação de fontes de energia elétrica não renováveis a nível global em 2017. • No Brasil o crescimento de base instalada a partir de fonte não renovável em 2017 foi menor que 1%, enquanto aumento mais que oito vezes do ponto de vista solar e mais de vinte por cento o parque eólico. • Enquanto globalmente o consumo de eletricidade cresce a ritmo de 1% ao ano, no Brasil este índice foi de 4,6% entre Julho de 2017 e Julho de 2018. • Na matriz energética nacional 6,7% ou 11,27GW instalados são produzidos a partir do uso do bagaço de cana de açúcar.

Fonte: Elaboração própria

A leitura deste subitem até o resumo da tabela 4.1.1 permite observar o contexto de alteração na maneira de se produzir, comercializar e consumir energia em que o mundo vem passando, bem como a razão por trás deste movimento, que nada mais é que a busca de se obter um desenvolvimento com uma sustentabilidade mínima de médio e longo prazo para a possibilidade de vida no planeta terra a partir da redução nas emissões de CO₂ como consequência da tentativa de menor dependência dos combustíveis fósseis.

Foi possível observar também que o setor de eletricidade parece ser o que primeiro está se ajustando a este novo contexto, haja visto que apesar de o consumo global de combustíveis fósseis ainda ser crescente, neste setor esta equação não só se inverte, como também há a desativação de

plantas movidas a combustíveis não renováveis. Os setores de aquecimento e transporte, ao que indicam os estudos (REN 21, 2018) ainda não atingiram o mesmo nível de maturidade.

Tendo realizada a análise energética a níveis global e nacional e revisado o aspecto eletricidade com maior ênfase, se dedica no tópico a seguir ao histórico de produção de energia no setor sucroalcooleiro.

3.0 O SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL

3.1 Histórico de produção e seu contexto atual

Neste trecho do trabalho é realizada uma revisão bibliográfica no intuito de obter aspectos que destacam as vantagens e desafios de produção de energia nas usinas de açúcar e álcool, reforçando a importância atual estratégica de se investir em eficiência energética para o setor.

A cana de açúcar foi trazida ao Brasil pelo portugueses devido as condições climáticas favoráveis que o país apresenta e ao seu alto valor de comercialização no século XVI, para a época tão alto quanto ao ouro. E foi com a cana de açúcar que se deu o primeiro grande ciclo econômico brasileiro (MACHIN, 2015).

Por mais de dois séculos o açúcar foi o principal produto de exportação do país, que desacelerou com as minas de ouro. A retomada de importância do setor sucroalcooleiro no contexto nacional se deu já no início do século XX, a partir do anos oitenta, com a crise do petróleo e a reação do governo via o programa Proálcool, que fomentou um novo ciclo de incentivos e crescimento. Foram a tradição, mas fundamentalmente o Proálcool e sua continuidade, que permitiram o desenvolvimento do setor de maneira tal que o Brasil se tornou, e vem se mantendo, como um dos maiores produtores e exportadores de derivados de cana de açúcar do mundo. (BUDNY & SOTERO, 2007), (ROTHER 2008).

Quando o tema é especificamente a produção de energia térmica ou elétrica nas usinas de cana de açúcar, por volta de 1975 já se usava como combustível o bagaço de cana, subproduto da fabricação de açúcar e álcool, para produzir energia. Outrossim, foi com o Proálcool e algumas mudanças da legislação de comercialização de energia, que as usinas saíram do alto-consumo à venda. Hoje em dia há casos de utilização não somente do bagaço, mas também de folhas, pontas e há até mesmo vinhaça (AZEREDO, 2007).

Seja para autoconsumo ou venda de excedente, todo o processo de produção de energia nas usinas está calcado no utilização do vapor. Nascimento & Lora (2004) argumentam que do ponto de vista histórico muitas foram as tentativas frustradas de se obter um funcionamento satisfatório das turbinas a gás, sendo as turbinas a vapor muito mais fáceis de se projetar, construir e funcionar, uma vez que o trabalho e sofisticação da compressão são muito menores. Talvez esta seja uma das razões possíveis pelas quais todo o processo de cogeração no setor sucroalcooleiro esteja baseado na produção e utilização do vapor.

Cabe aqui um pequeno adendo com a definição de cogeração, que se trata da produção simultânea de mais de uma forma de energia, no caso das usinas de açúcar isto significa que se obtém

concomitantemente energia elétrica e/ou mecânica e vapor para o processo. De uma maneira um pouco mais técnica Romão Junior (2009) apresenta a definição de cogeração como a produção simultânea de calor útil e potência elétrica e/ou mecânica, com o uso sequencial da energia liberada a partir de uma fonte primária de combustível, ou entre outras palavras, um aproveitamento de uma parcela da energia rejeitada conforme previsto na segunda lei da termodinâmica, resultando no aumento da eficiência global do ciclo.

A título de informação geral, no Centro-Sul do Brasil a colheita ou safra nas usinas se concentra no período de Abril/ Maio a Novembro/Dezembro de um mesmo ano, enquanto na região Norte-Nordeste ocorre entre Agosto/Setembro de um ano até Março/Abril do ano seguinte. O estado de São Paulo é o principal produtor, e segundo Machin (2015) a maioria das centrais de cogeração no Brasil já tem condições de operar durante todo o ano. A evolução alcançou tais proporções, que conforme UNICA (2017), desde 2013 o setor sucroenergético vem gerando mais para o SIN (Sistema Integrado Nacional) do que para consumo próprio, em uma relação média de 60% de energia para a rede e 40% para consumido internamente.

Em um segundo momento, UNICA (2018) aponta algumas das vantagens de se utilizar a energia elétrica excedente das usinas; Sendo as principais relacionadas a redução das perdas em transporte de energia e economia em infraestrutura de transmissão pela proximidade entre os pontos de geração e consumo.

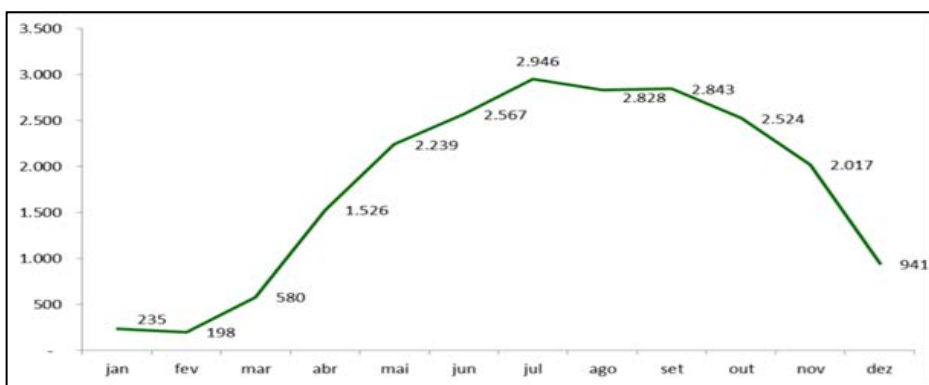
As questões ambientais e seus respectivos acordos globais, que buscam limitar a emissão de gases de efeito estufa contribuintes do aumento do aquecimento global, só favoreceram ao uso tanto do etanol como do bagaço, palha, pontas e vinhaça oriundos da cana de açúcar, já que se trata de um combustível renovável (desde que o reflorestamento seja feito de forma adequada como chama a atenção Coelho (1998)) frente aos combustíveis fósseis. Como menciona Machin (2015), de uma maneira mais ampla, a biomassa como um todo tem sido reconhecida por muitos pesquisadores como uma fonte limpa e promissora para geração de eletricidade, por produzirem um balanço de emissões de CO² praticamente neutro.

Sendo a biomassa uma das principais fontes energéticas para o desenvolvimento sustentável, seu uso tem sido cada vez mais recomendado nas mais diversas indústrias. Machin (2015) afirma que cana de açúcar em 2015 já era cultivada em 80 países com os subprodutos obtidos a partir do processo de produção de açúcar e etanol representando um grande potencial de biomassa. A produção mundial em 2015, segundo a mesma autora, atingiu os 1.2 Gton cana/ano e assim sendo seus resíduos potencializam produção de energia elétrica de cerca de 300 TWh/ano. Tomando como base que a produtividade média de cana seja 100t/ha (toneladas por hectare).

Conforme Innocente (2011), as vantagens ambientais e econômicas das térmicas a bagaço de cana versos as que operam com combustíveis fósseis são claras, dentre outras, o bagaço de cana possui (a) o custos de produção debitados na indústria do produto nobre ou principal, o etanol ou açúcar, (b) todo o sistema de transporte ocorre por conta do produto principal, (c) a produção de bagaço no processo se concentra em um ponto do processo, após a moagem, que facilita a coleta dentro da usina.

Outro aspecto a favor da cogeração a partir da cana de açúcar, vem do fato de haver um intercambio sazonal entre potencial de geração das hidrelétricas e a safra de cana de açúcar, já que o período de maior produção nas usinas normalmente coincide com o de estiagem do setor hidrelétrico, como afirma Coelho (1992) e confirma UNICA (2018) com dados que na safra 2016/2017 cerca de 96% da eletricidade exportada pelo setor sucroalcooleiro se deu entre Abril e Novembro, sobrepondo-se em grande parte do tempo com o período seco de eletricidade, que ocorreu no período de Maio a Novembro, como Ilustrado na figura 4.2.1 a seguir.

Figura 4.2.1 Geração mensal de bioeletricidade sucroenergética para a rede, 2017 (GWh)



Fonte: UNICA 2018.

Tomando como base os argumentos apresentados neste subtítulo até o momento, pode-se resumir as vantagens da cogeração em usinas de açúcar e álcool, conforme apresentado na tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 Vantagens da cogeração nas usinas de açúcar e álcool

Vantagens da cogeração nas usinas de açúcar e álcool
• Experiência histórica do país no trabalho com cana de açúcar. • Aceleração no desenvolvimento tecnológico, ganho de importância estratégica nacional e crescente exportação de energia excedente a partir do programa Proálcool. • Ocorreu e ocorre o desenvolvimento de novas tecnologias permitindo a produção de eletricidade e/ou energia mecânica utilizando como combustível também folhas, pontas e até mesmo vinhaça de cana de açúcar. • A maioria das centrais de cogeração nas usinas já tem condições de operar durante o ano todo. • A biomassa de cana de açúcar é uma fonte de energia renovável. • O custo da matéria prima, de seu transporte e movimentação é quase que totalmente absorvido pelo produto principal no processo, seja ele açúcar ou álcool. • 95% da geração de excedente no setor sucroalcooleiro entre 2016 e 2017 ocorreu no período de estiagem das hidrelétricas. • Em 2017, 60% da energia elétrica produzida foi para exportação e 40% para consumo próprio. • O fato da cogeração estar mais próxima do centro de consumo faz com que os custos de transmissão e respectiva infraestrutura sejam reduzidos.

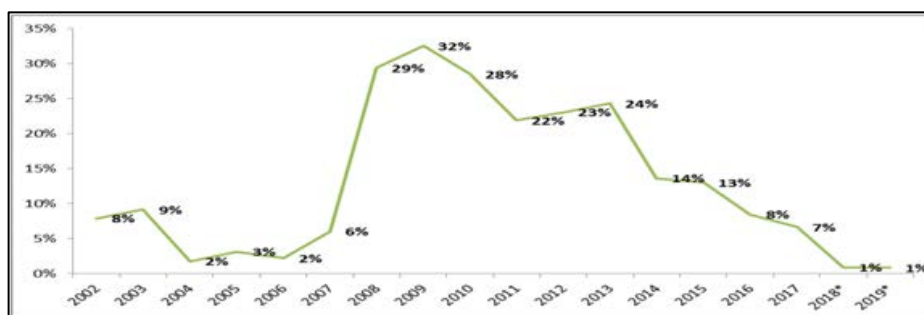
Fonte: Elaboração Própria

Como visto, diversas são as vantagens do fato de se ter sistemas de cogeração dentro das usinas de açúcar e álcool, todavia, é necessário ressaltar que também existem limitações técnicas e dificuldades mercadológicas em termos de competitividade, aspectos explorados com um pouco mais de detalhe nos parágrafos a seguir.

Como constatado por Machin (2015), do ponto de vista técnico o bagaço de cana de açúcar possui alta umidade, baixa densidade, alta granulometria, pouca homogeneidade e se decompõe em caso de estocagem por longo tempo, além do aspecto de que as usinas de açúcar e álcool possuem em sua maioria uma baixa eficiência em seus sistemas de cogeração. Em suas análises Coelho (1992) demonstra que o rendimento nos processos dentro das usinas são baixos, e na época estavam na ordem de 6%, valores estes que foram somente melhorados em algumas usinas conforme aponta Bridgwater (2012), justamente as que fizeram uso de sistemas de queima em suspensão de bagaço mais modernos, que permitem aumentar a temperatura e a pressão do vapor superaquecido das caldeiras. Este fato permite observar então que a sugestão feita em Coelho (1992) continua não completamente implementada. Esta melhor eficiência obtida a partir de caldeiras com maiores pressões e temperaturas permitiria, conforme Kuntal & Sudipta (2014), níveis de eficiências médios próximos de 30%, entretanto, UNICA (2018) aponta para um aproveitamento técnico médio atual na cogeração das usinas no setor como ao redor de 14%, ou menos que a metade do potencial que se obtém somente aumentando as temperaturas e pressões do processo.

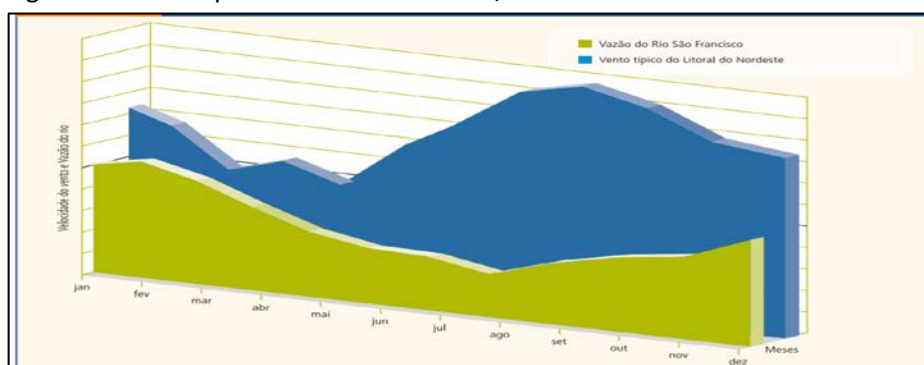
Deixada a abordagem puramente técnica por um pequeno instante para uma observação ao aspecto mercadológico, ao tomar como critério o acréscimo anual da venda de energia elétrica excedente das usinas de açúcar e álcool na matriz energética nacional, ou seja a competitividade versus as outras fontes, há se pesar o fato de que o ambiente de produção e comercialização de energia no país e no mundo vem sofrendo o que alguns autores denominam não simplesmente de evolução, mas sim de revolução (IRENA, 2017; CSIS, 2018; MULDER, 2017), com as usinas de açúcar e álcool se observa uma desaceleração como destacado na figura 4.2.2. As figuras 4.2.3 e 4.2.4 a seguir são apresentadas também, de forma a permitir uma comparação e análise dos dados evolutivos traçando uma relação com a geração eólica.

Figura 4.2.2. Representatividade do acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa de cana de açúcar em relação ao total de acréscimo na matriz elétrica, período 2002 a 2019, Brasil [%].



Fonte: UNICA 2018.

Figura 4.2.3. Complementariedade eólica/ hídrica.

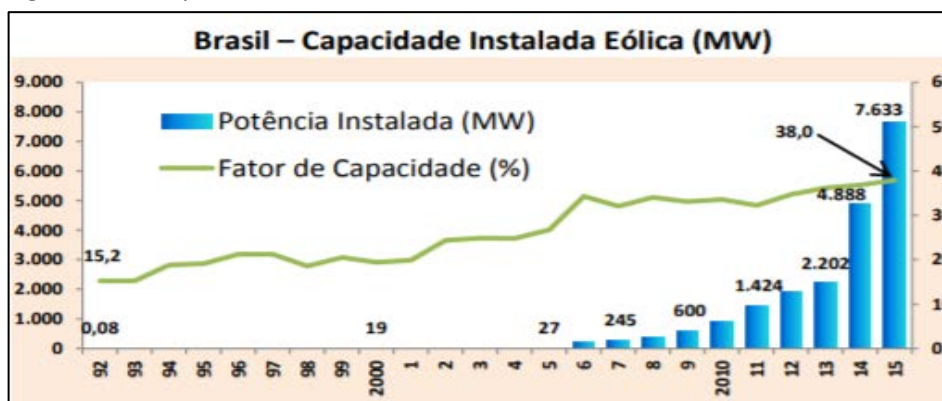


Fonte: EOLICA 2018.

A partir dos dados das figuras 4.2.2 a 4.2.4 é possível inferir que a evolução ou acréscimo anual de potência no setor sucroalcooleiro tem sido proporcionalmente menor ano a ano, exatamente o oposto ao que ocorre em relação a geração eólica; E ainda, que a sazonalidade apontada como vantagem à produção de energia elétrica excedente nas usinas, também serve de argumento à geração eólica como ilustrado no gráfico da figura 4.2.3. A figura 4.2.4 quebra um pouco o paradigma do fator de capacidade, que antes enfraquecia a competitividade da geração eólica, haja visto que já se falava de quase 40% em 2015, com tendência ascendente. Segundo dados da ANEEL (2018) a base

instalada de eólica atingiu os níveis de 13GW em Janeiro de 2018 (potência instalada a partir do bagaço de cana na mesma data é de 11,27GW), com ritmo de crescimento acima de 20% ao ano nos últimos 5 anos. Tudo isto demonstra uma perda mercadológica de espaço da biomassa de cana de açúcar na matriz energética brasileira. Sempre observando que se tratam de duas fontes consideradas renováveis.

Figura 4.2.4 Capacidade instalada eólica [MW]



Fonte: MME 2016

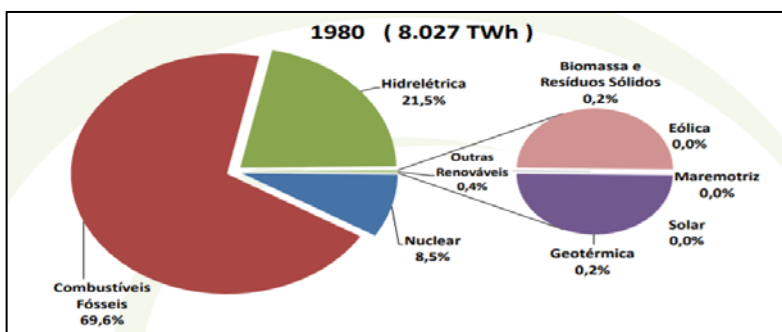
Esta preocupação foi feita por UNICA (2018) quando observou uma evolução de 1.750MW em 2010, 490MW em 2015, uma previsão de somente 58MW para 2018 e 70MW para 2019. Um outro dado que colabora com toda esta argumentação se trata do leilão A-4 de abril de 2018 aonde 75% do volume contratado no mercado ACR (ambiente de contratação regulada) foi a fonte fotovoltaica, 11% eólica, 10% o pequenas hidrelétricas (PCH e CHG), contra somente 6% para biomassa como um todo. Santos (2012) é um autor que notou esta tendência, mesmo um pouco antes dela tomar as proporções atuais.

Fatos que colaboram para a argumentação de que o fenômeno da revolução no setor elétrico não é somente local estão também no olhar da EPE (2017), cujo alguns pontos são apresentados de forma sucinta nas figuras 4.2.5 e 4.2.6 a seguir, aonde a comparação entre os dois gráficos claramente demonstra a redução de investimento em fontes que utilizam combustíveis fósseis, acompanhado do crescimento da presença de energia elétrica a partir da matriz eólica em uma maior proporção do que biomassa como um todo, levando em conta que o bagaço de cana de açúcar é somente uma fração dentro de biomassa.

Um outro aspecto que o autor Santos (2012) chama a atenção em seu trabalho está no fato de que na região Centro-Sudeste o bagaço e a palha (para o autor incluso pontas e folhas) estão se tornando escassos em algumas épocas do ano, lembrando que se trata de algo que já foi comercializado a anos atrás a preços irrisórios como apontou Coelho (1992). Santos (2012) comenta ainda a contradição entre a falta de bagaço e a possibilidade pouco aproveitada de plantio e utilização da

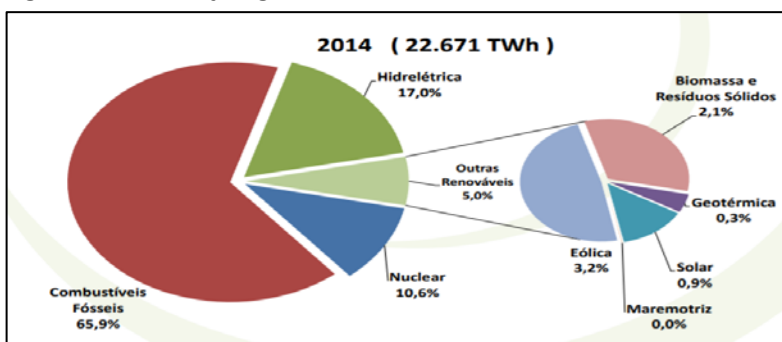
cana de açúcar de terceira geração ou com poder calorífico superior, mais adequada a produção de energia. Por outro lado, a de se comentar que se assim o fizer, as usinas teriam custos adicionais no transporte do bagaço dedicado a energia, e esta talvez seja uma das aplicações para esta aparente contradição apontada pelo autor.

Figura 4.2.5 Geração global de eletricidade em 1980



Fonte: EPE, 2017

Figura 4.2.6 Geração global de eletricidade em 2014



Fonte: EPE, 2017

De forma resumida, a descrição dos desafios técnicos e dificuldades mercadológicas apresentadas é ilustrada na tabela 4.2.2 a seguir:

Tabela 4.2.2 Dificuldades e desafios da cogeração nas usinas de açúcar e álcool

Dificuldades técnicas e desafios mercadológicos da cogeração nas usinas de açúcar e álcool
- Alta umidade (cerca de 50%) - Baixa densidade energética - Não homogêneo e com alta granulometria - Decomposição em caso de estocagem por longo períodos - Em geral os processos de cogeração de energia ainda trabalham com baixo rendimento (entre 6% e 14%) - Perda de mercado da biomassa por substituição para a fonte energia eólica, tanto no contexto nacional (crescimento eólica 20%, biomassa de cana 1%), quanto no global (0,2% versus 3,2% no mesmo período).

Fonte: Elaboração Própria

A gaseificação aparece então como uma opção aonde se tornaria possível essencialmente um ganho de eficiência, permitindo melhorar a competitividade mercadológica da energia elétrica excedente

no setor sucroalcooleiro, entretanto vale a observação de que mesmo sendo um tema estudado a algumas décadas, ainda existem barreiras tecnológicas a serem vencidas.

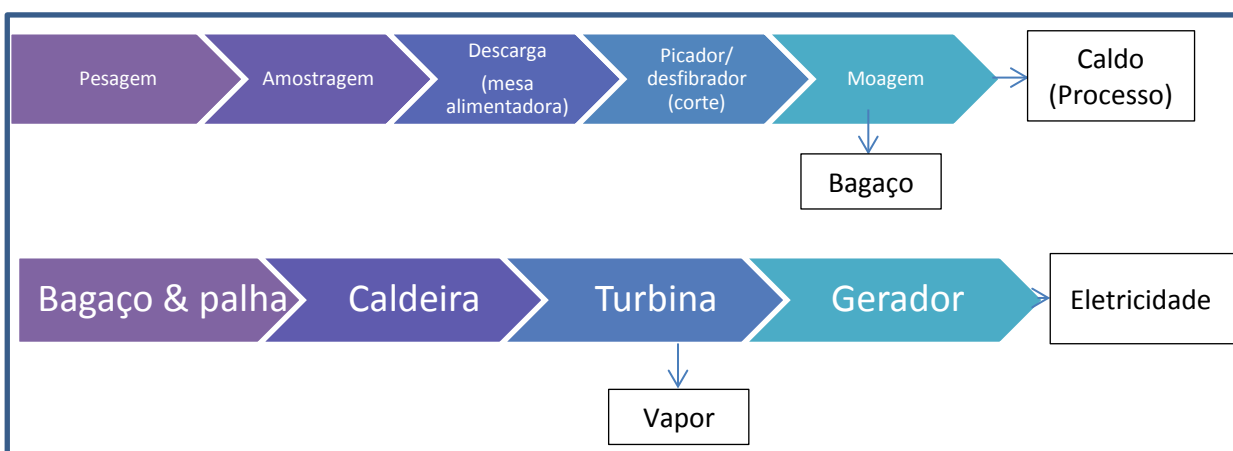
Este trecho do trabalho tem então seu objetivo cumprido após apresentar uma versão macro do contexto histórico nas usinas de açúcar e álcool e verificar as vantagens e desafios atuais na comercialização de excedente de energia elétrica do setor sucroalcooleiro. Na sequência se estuda uma visão geral do processo de cogeração desde o recebimento da cana até a produção de energia térmica ou elétrica com o ciclo tradicional a vapor e a apresentação de uma configuração típica, mais ao final do subitem são agregados alguns valores típicos de produtividade e dados físico-químicos utilizados como referência no setor.

3.2 A Cogeração a Vapor nas Usinas de Cana de Açúcar.

Como já mencionado, além de revisar o processo básico de uma usina de açúcar e álcool, o objetivo aqui é contextualizar como se produz e se comercializa energia no setor. Inicialmente com um olhar sobre o processo de produção de energia, seguido de uma observação do perfil construtivo atual das usinas em termos de configuração. Para facilitar cálculos, avaliações e estimativas este subitem encerra-se com alguns dos índices médios de produtividade e físico-químicos utilizados no setor.

Conforme Coelho (1992), o processo de produção em uma usina de açúcar e álcool segue o fluxograma apresentado na figura 4.3.1. Ou seja, depois de coletada no campo, o que principalmente na região Sudeste/ Centro-Oeste hoje é feito de maneira quase que 100% mecanizada, a cana é pesada, amostras são retiradas para análise físico-químicas e determinação por exemplo do índice ATR (açúcares totais recuperáveis), e então tudo é descarregado em uma grande mesa alimentadora da usina. Por meio de esteiras a cana é transportada até os picadores e desfibradores, e na sequência o mesmo é esmagada ou moída no processo denominado de moagem, de onde se extrai o caldo para o processo de açúcar e álcool, e o bagaço que será utilizado no processo de cogeração.

Figura 4.3.1 Processo de cogeração na usina de açúcar e álcool.



Fonte: Adaptado de Coelho (1992)

A figura 4.3.1 apresenta também de forma simplificada o processo de cogeração de energia, ou seja, o bagaço e a palha (pontas e folhas), são levados por meio de esteiras à caldeira aonde sofrem combustão, e o calor no interior da caldeira faz com que a água circulante assuma o estado de vapor superaquecido, que em alta pressão e temperatura se expande na sequência em uma turbina rotacionando seu eixo. Esta turbina acoplada a um gerador elétrico permite que se produza eletricidade, seja para consumo próprio ou exportação de excedente. As turbinas normalmente possuem também uma saída ou extração de vapor em baixa pressão, empregado na fábrica ou no processo de produção de açúcar e álcool, em etapas como tratamento, destilação, evaporação e

cozimento. Como há a produção simultânea de vapor e eletricidade a partir de um mesmo combustível, este processo se caracteriza, como já visto, como uma cogeração.

Vale pontuar ainda outros dois aspectos da figura 4.3.1. O primeiro, que o bagaço é um subproduto inevitável da produção de açúcar e álcool, o que historicamente já significou um “problema” aos usineiros quanto a sua destinação, e segundo, que a figura apresenta uma versão simplificada e didática do processo de cogeração sem entrar em detalhes, servindo portanto unicamente como uma ilustração introdutória ao tema. Outrossim, mesmo com este sistema simples já é possível inferir que as eficiências dos seus componentes, ou seja, da caldeira, da turbina e do gerador irão influenciar na performance do todo, assim como também é um fator de influência o poder calorífico do produto principal da cogeração, seja ele bagaço somente, ou incluindo palhas e pontas.

Olhando os sistemas de cogeração com um pouco mais de detalhe, suas construções se baseiam no ciclo Rankine. Como um adendo, este ciclo é definido por Romão Junior (2009) como baseado em quatro processos derivados de seus componentes (gerador de calor ou caldeira, turbina, condensador e bomba) que ocorrem em regime permanente, onde o fluido apresenta mudanças de fase nos processos, que ocorrem a pressão constante. Uma ilustração mas didática aparece mais à esquerda da figura 4.3.2 destacando que água é o fluido de trabalho, o mesmo ciclo é apresentado outra vez na mesma figura, porém de uma maneira um pouco mais técnica ao centro, aonde estão destacados os pontos de acréscimos e extração de calor e trabalho, por último na mesma figura está um diagrama T (temperatura, geralmente em K) por s (entropia, normalmente em kJ/kg.K). Considerando h entalpia específica em kJ/kg por exemplo, temos as seguintes equações válidas para esta figura:

$$\text{Gerador } Q_{in}=h_1-h_4; \quad (1)$$

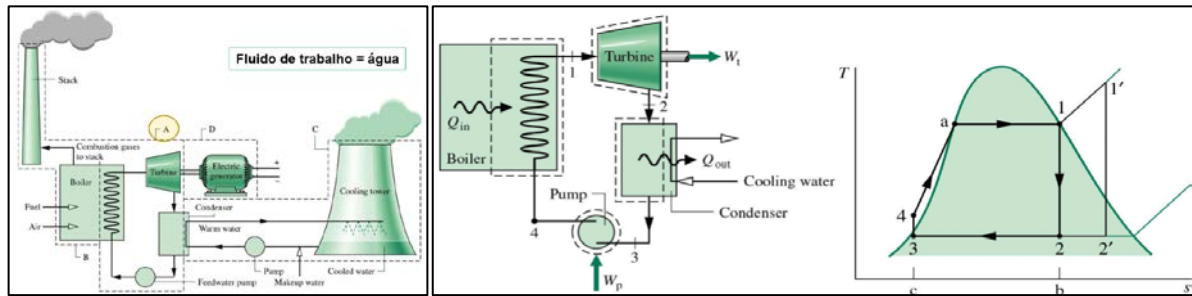
$$\text{Trabalho na turbina: } W_t=h_1-h_2 \quad (2)$$

$$\text{Condensador } Q_{out}=h_2-h_3 \quad (3)$$

$$\text{Bomba: } h_4-h_3 \quad (4)$$

Um exemplo construtivo das variações do ciclo Rankine, ainda que pouco empregado, extraído de Santos (2012) é ilustrado na figura 4.3.3 seguir, aonde se utiliza uma turbina do tipo CEST (condensing extraction steam turbine). Estas turbinas são também chamadas de turbinas mistas por possuírem uma condensação e uma contrapressão na mesma carcaça. As turbinas de condensação, são construídas de uma forma levando em conta que sua saída se conectará a um condensador como no caso do ciclo Rankine, já as turbinas do tipo contrapressão são fabricadas considerando que suas saídas serão ligadas ao processo.

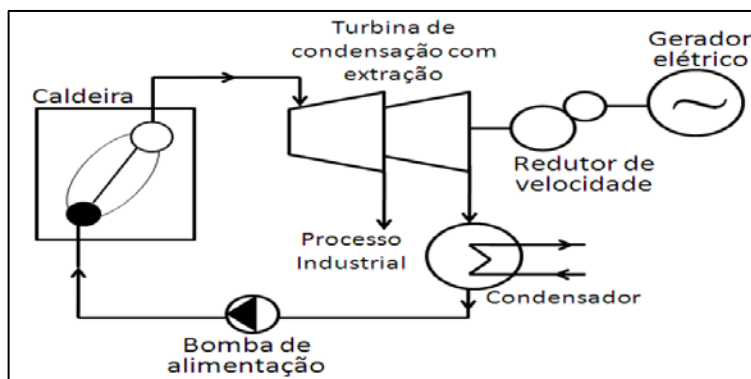
Figura 4.3.2 Representação esquemática do ciclo Rankine ideal



Fonte: Adaptado de Inocente 2011

Nas turbinas mistas ou CEST, válvulas de controle e admissão regulam a distribuição de vapor seja para o processo ou para geração de energia elétrica. Este exemplo da figura 4.3.3 é apresentado primeiro por ser considerado segundo Machin (2015), Coelho (1992) e Santos (2012), como a opção mais eficiente de turbina produzindo energia em uso (apesar de proporcionalmente pouco) no setor sucroalcooleiro.

Figura 4.3.3 Esquema simplificado de cogeração utilizando turbina do tipo condensação-extração



Fonte: Santos 2012

Complementarmente ao modelo de turbinas empregadas no processo de cogeração, Chicao (2017) considera importante classificar diferentes usinas conforme sua capacidade de processamento, já que assim se pode definir diversos níveis potenciais de produção de energia por tipo de usina. Sua classificação é apresentada na tabela 4.3.1 a seguir.

Tabela 4.3.1 Classificação das usinas conforme a capacidade de moagem.

Porte da usina – classificação	Cana de açúcar processada por safra
Muito grande	Moagem acima de 5 milhões
Grande	Moagem entre 4 e 5 milhões
Média Alta	Moagem entre 3 e 4 milhões
Média	Moagem entre 2 e 3 milhões
Pequena	Moagem entre 1 e 2 milhões
Muito Pequena	Moagem abaixo de 1 milhão

Fonte: Chicao 2017

Em sua análise o Chicoa (2017) também aponta que todas as usinas em operação no Brasil são autossuficientes, porém com somente 53% (de 378) comercializando seus excedentes de energia elétrica. Cabe ressaltar que o estado de São Paulo detinha em 2017 155 (41%) das 378 unidades em operação, mantendo-se historicamente na liderança no setor.

Do ponto de vista de comercialização, o EPE 2017 aponta que no respectivo ano 57% das usinas venderam seu excedente de energia no mercado livre (ACL), e somente 8% comercializaram exclusivamente no mercado regulado (ACR), e ainda que o restante equivalente a 35%, operaram em ambos os ambientes.

Para auxiliar no cálculo de eficiências médias no sistemas, alguns dados médios do setor foram coletados da bibliografia pesquisada. As tabelas 4.3.2 a 4.3.4 apresentam parte destes índices que tratam de dados físico-químicos e valores de produtividade média do bagaço e seus derivados. Coelho (1992) se utiliza dos itens relacionados na tabela 4.3.2, Machin (2015) e Chicoa (2017) apresentam o conteúdo da tabela 4.3.3. Por último Santos (2012) é quem propõe os parâmetros da tabela 4.3.4.

Tabela 4.3.2 Índices típicos do setor por Coelho

Índice	Valor
Percentual de umidade no bagaço em peso	50%
Proporção do bagaço/peso da cana na usina colhida	25%
Rendimento teórico médio de um ciclo Rankine padrão	30%
Fator de utilização usina de açúcar	50%
Produção 1992	70 10 ⁶ ton. cana moída (tcm)
Poder calorífico superior do bagaço de cana com 50% de umidade	2.28 10 ³ kcal/ kgb (Quilograma de bagaço)
Poder calorífico superior do bagaço de cana com 22.5% de umidade	2.90 10 ³ kcal/ kgb
Poder calorífico superior do bagaço de cana com 20% de umidade	3.50 10 ³ kcal/ kgb
Poder calorífico superior do bagaço de cana com 15% de umidade	3.90 10 ³ kcal/ kgb
Conversão Kcal/KWh	kWh/860 kcal
Relação Bagaço/ tonelada de cana com 50% de umidade.	265 kgb/ tcm
Processamento de uma usina média a época (1992)	300 tcm/ h (hora)
Produção de açúcar em uma usina média a época (1992)	6500 toneladas/ dia
Produção de álcool em uma usina média a época (1992)	400 m ³ /dia
Pressão manométrica de vapor de processo usina média (1992)	1.5 kgf/cm ²

Fonte: Coelho (1992)

Tabela 4.3.3 Índices típicos do setor por Machin

Índice	Valor
Relação bagaço/ tonelada de cana com 50% de umidade	240 a 250kg/tcm (Neste trabalho se opta por utilizar 250)
Relação palhas / tonelada de cana moída com 50% de umidade	200kg palhas e pontas/ tcm
Relação média de energia/ tonelada de cana moída	1MWh/ 6.5 tcm
Percentual de umidade do bagaço em peso	45- 55%
Peso do bagaço/ peso da cana na usina	24 a 30%
Peso específico aparente do bagaço amontoadado	160 a 240 kg/m ³
Peso específico aparente do bagaço solto	80 a 120 kg/m ³
Peso específico adotado quando em transporte por caminhão	160 kg/m ³
Peso específico adotado quando em correia transportadora	130 kg/m ³
Percentual de umidade em peso	50%
Percentual de fibras no peso	46%
Percentual de sólidos dissolvidos no peso	4%

Fonte: Machin (2015)

Tabela 4.3.4 Valores típicos no setor por Santos

Índice	Valor
Moagem tonelada de cana/ ano	2.000.000
Tempo de safra em dias	240
Aproveitamento do tempo médio	85%
Relação bagaço/ cana	25%
Utilização da palha	Não
Consumo específico de vapor por tonelada de cana [kg/tc]	450
PCID da palha [kJ/kg]	12.811
Reserva de bagaço para partidas das caldeiras [%]	4,00

Fonte: Santos (2012)

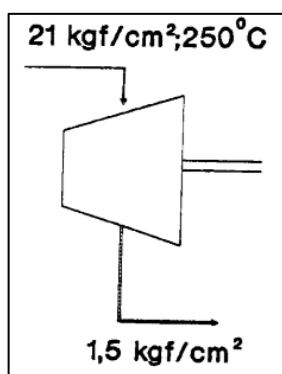
Após revisto o processo básico de produção de energia nas usinas, passado pelo ciclo Rankine, observado a ilustração com uma turbina mista, revisado qual a proporção de comercialização do setor no mercado livre e no regulado, encerrando com as tabelas de índices de propriedades físico-químicas típicas do setor, tem-se como cumprido o objetivo deste subitem e a abordagem básica considerada importante para iniciar a avaliação de aspectos relacionados a eficiência nos sistemas de cogeração atuais nas usinas de açúcar e álcool, tema do próximo subitem.

3.3 A Abordagem Atual Quanto a Eficiência

Após revisar o histórico e o cenário atual de produção e consumo de vapor nas usinas, inicia-se um aprofundamento na análise do aspecto eficiência, explorando algumas configurações típicas.

Como historicamente a primeira preocupação, por ser a fonte de receita nas usinas, foi a produção de açúcar e um pouco mais adiante de etanol, o foco sempre esteve no processo. Os empreendedores parecem ter se preocupado na ordem de importância em primeiro garantir constância e suficiência de vapor para o processo, e daí então se possível, com alto suficiência elétrica. Produção de excedente de eletricidade para comercialização passou a ser um tema e uma fonte de receita somente após o Proálcool e algumas mudanças na legislação, quando o mercado de comercialização de eletricidade tornou-se efetivamente aberto, algo que se deu mais já no final do século XX. O tema eficiência em cogeração poucas vezes aparece como tendo espaço e foco histórico. Para exemplificar utiliza-se do trabalhado de Coelho (1992), que toma como base uma típica usina real do interior paulista produzindo e consumindo vapor com o configuração construtiva conforme ilustrado na figura 4.4.1. Uma caldeira gerando vapor a 21 kgf/cm^2 (manométricos), 250°C ligada à uma turbina de contrapressão com sua saída conectada ao processo que necessita regularmente $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ (manométricos) de vapor. Nesta configuração não há condensador na saída da turbina e portanto não se trata de um ciclo Rankine. A autora observou que dos $45,68 \text{ kWh/tcm}$ de energia térmica produzida, somente $0,5 \text{ kWh/tcm}$ eram excedente.

Figura 4.4.1 Configuração típica em uma usina sucroalcooleira



Fonte: Coelho (1992)

Considerando o rendimento térmico do processo como toda a energia produzida ($45,68 \text{ kWh/tcm}$) dividido pelo potencial energético de entrada ($2280 \text{ kcal/kgb} * 265 \text{ kgb/tcm} * \text{kWh}/860\text{kcal} = 702,558 \text{ kWh/tcm}$) Coelho (1992) chegou a $6,50\%$. Com um pouco mais de análise a autora notou que o rendimento da caldeira neste caso estava em torno de 60% , da turbina aproximadamente 63% e o gerador tinha 95% de eficiência (embora já na época existiam caldeiras disponíveis no mercado com eficiência de cerca de 85% e turbinas com valores entre 70 e 80%). Scott, Bain & Kinoshita (2002)

apontam para valores na América Central de cerca de 20 kWh/ tonelada de cana moída, de menos da metade. Parece ser consenso que um processo com pouco mais de 6% de rendimento pode ser classificado como ruim do ponto de vista termodinâmico, já que possui em torno de 9 a 10 vezes, ao que um ciclo Rankine tradicional de geração de energia apresentaria, cerca de 30%, ou ainda se comparado aos níveis médios de plantas utilizando biomassa de madeira em operação nos Estados Unidos na época, que segundo a própria autora, possuíam rendimentos médios em torno de 18%. Este exemplo elucida como a preocupação com a eficiência energética dos ciclos de cogeração nas usinas de açúcar e álcool nem sempre foram objeto de foco e atenção de seus empreendedores.

Dos três tipos de turbina já comentados em subitens anteriores; turbina de condensação, contrapressão e condensação com extração, segundo Coelho (1992), Santos (2012) e Machin (2015) esta última é a que apresenta maior rendimento para cogeração no setor sucroenergético. Uma observação importante relatada pelos autores está no fato que palhas e pontas possuem potencial de produção energético 85% maior que o bagaço.

Romão Junior (2009) defende a utilização de palha como combustível suplementar nas caldeiras de alta pressão para aumentar significativamente a quantidade de energia excedente gerada fazendo uso de dois argumentos principais: (a) A palha possui poder calorífico que é quase o dobro ao do bagaço, e (b) A colheita mecanizada com a diminuição da prática de queima prévia que aumentou significativamente a quantidade de palha disponível no campo. Algo interessante é a experiência do autor que recomenda o armazenamento da palha por até duas semanas antes de ser utilizada, haja vista a redução da umidade neste intervalo de 50% para 15%, o que uma vez mais colabora para uma melhora de rendimento e portanto de energia excedente gerada no sistema de cogeração, saindo de mais que 85% para até cerca de 98% mais potencial energético do que o bagaço.

E qual seria o maior rendimento teórico possível?

Tanto Nascimento & Lora (2004) quanto Simões Moreira (2017) ilustram que utilizando-se da configuração ciclo de Carnot e respeitando-se a segunda lei da termodinâmica, se obtém a equação de rendimento máximo possível de um ciclo a vapor como dada por:

$$1 - (T_L/T_H) = 1 - (Q_L/Q_H) \quad (5)$$

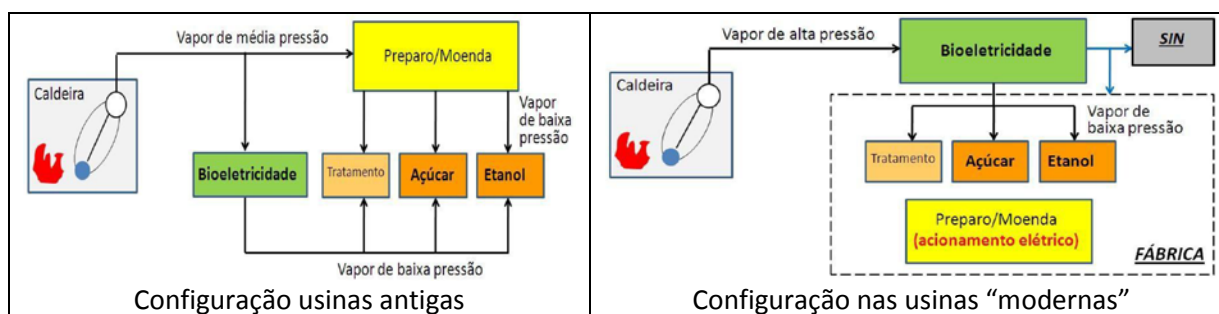
Nesta equação “L” refere-se a “low” ou baixo do inglês, em nosso caso simplesmente fria, e H trata-se de “high”, alta ou alto do inglês ou simplesmente quente. Vale notar que as temperaturas são absolutas, ou seja em kelvin. Já a letra “Q” representa fluxo de calor em watts. Os autores chamam também a atenção ao fato de que este ciclo assume que os processos são reversíveis e tanto turbina e bomba são isentrópicas, ou seja, o valor obtido com o ciclo de Carnot é idealizado e não existe na

vida real. Os sistemas reais possuem rendimentos menores que os de Carnot pois há perdas por atrito, pelo fato de que trocas de calor ocorrem com diferenças finitas de temperatura, e porque turbinas e bombas não são isentrópicas, para enumerar alguns dos aspectos. Outrossim o rendimento de Carnot trata-se de uma boa referência que facilita bastante os cálculos e indica quanto seria o máximo rendimento teórico possível em caso de um ciclo ideal. Em termos práticos ambos autores apontam o rendimento máximo possível como próximo a 62% para o ciclo Rankine ideal.

Simões Moreira (2017) aponta ainda algumas variações do ciclo Rankine que permitem obter maiores eficiências, tais como com superaquecimento, aonde se acrescenta um superaquecedor a saída da caldeira ou do gerador de vapor, colaborando não somente em termos de eficiência mas como também na redução de risco de corrosão nas pás das turbinas; ou ainda com reaquecimento, que aproveita a vantagem de se manter trabalhando com pressão e temperatura elevadas e evita uma quantidade excessiva de líquido nos estágios de baixa pressão da turbina. Neste último processo a expansão se dá em um ponto intermediário no diagrama quando comparado ao ciclo tradicional, e o fluido sofre um novo reaquecimento, expande e retorna para o estágio de baixa pressão; o autor sugere ainda uma terceira técnica, com extração de vapor da turbina e mistura com líquido, denominada de ciclo Rankine regenerativo com aquecedores de mistura, citando que nesta última configuração as eficiências térmica são crescentes com o aumento do número de extrações e misturas no processo. Os ciclos alternativos de Rankine não são estudados com profundidade no presente trabalho, haja visto o foco em gaseificação do bagaço, entretanto, não de ser considerados sim, já que são opções reais de melhoria de rendimento na cogeração utilizando o combustível vapor na usina.

Ainda com olhar à eficiência dentro das configurações atuais nas usinas, Chioa (2017) apresenta duas configurações típicas, sendo a primeira denominada pelo autor de “antiga” e segunda de “moderna”, ambas utilizadas para exemplificar algumas das modificações que já ocorrerem com maior ou menor intensidade no setor em termos de aumento de eficiência na geração de bioeletricidade, apresentadas na Figura 4.4.2

Figura 4.4.2 Configuração dos ciclos térmicos nas usinas antigas e modernas.



Fonte: Chicoa (2017)

Ainda segundo o autor, a configuração classificada na figura 4.4.2 como usinas antigas continua presente na maioria das plantas do Brasil. Nesta, como se observa, o vapor principal com média pressão (os 21 kgf/cm² manométricos relatados por Coelho (1992)) é utilizado primeiro para o sistema de preparo e extração da cana de açúcar acionando picadores, desfibradores, bombas e moendas, etc., e somente o excesso é empregado para produção de bioeletricidade. Por trabalhar com pressões e temperaturas menores, a partir do já exposto é possível inferir que os níveis de eficiência térmica do processo não se afastam muito dos já apontados por Coelho (1992), e portanto a geração de excedente tende a ser próxima a inexistente. Ou, respeitando os dizeres do autor da figura, com a configuração a média/ baixa pressão e temperatura, os fluxos mássicos são baixos e portanto pequeno é o potencial de produção de bioeletricidade, como resultado a exportação de energia é nula ou muito pequena.

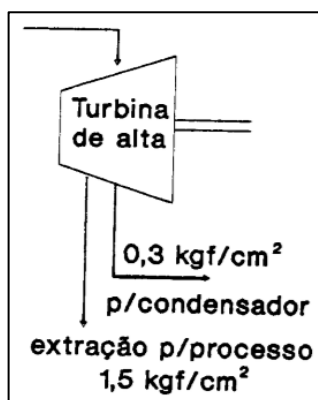
Já na configuração com vapor de alta pressão, além do maior potencial natural de produção de bioeletricidade, o ciclo está montado de maneira que todo vapor de processo passa primeiro pela turbina. Além disso, picadores, desfibradores, bombas e moendas (fase também conhecida como preparo) já não demandam mais vapor, pois os acionamentos são eletrificados por inversores com motores elétricos. Conforme Santos (2012) a eletrificação do preparo gera um ganho médio entre 15 e 20 kWh/tcm no sistema e as usinas com estes sistemas são as que conseguiram exportar energia excedente com lucratividade.

Com o intuito de melhorar este histórico de baixo rendimento infelizmente ainda presente na cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, existe uma iniciativa desde Dezembro de 2015 oriunda da CCEE (Câmara de Comércio de Energia Elétrica), UNICA (União da Indústria de Cana de Açúcar) e ABRACEL (Associação Brasileira de Comercialização de Energia) que é o chamado Certificado Energia verde. Processo de certificação que estabelece requisitos mínimos de eficiência para projetos de cogeração, nascido como algo que quer tornar compulsório para habilitação aos leilões de energia o atendimento a alguns requisitos mínimos de eficiência, atualmente estabelecidos em 42kWh/tcm excedente. Todavia, a velocidade de implementação deste programa é relativamente

baixa e até o momento o que está ocorrendo é somente a emissão de um certificado as empresa que se candidatam, pagam um valor, e comprovem atender aos requisitos. Cabe notar ainda que uma vez certificada, a empresa assume a responsabilidade de melhorar sua eficiência em 1% ao ano, sendo auditada bianualmente e estando sujeita a pena de perda do certificado. Mas até aonde se pode coletar informações, não há benefício atrelado ao cumprimento deste regra. Esta iniciativa atesta a necessidade de maior preocupação com a eficiência energética se tornando pauta no setor, por outro parece ainda não ter ganho os incentivos necessários para que ganhe amplitude significativa.

Para exemplificar o potencial de melhoria na eficiência energética, Coelho (1992) tomou como base a usina de açúcar do interior paulista apresentada na figura 4.4.1 e recalculou a eficiência energética do sistema utilizando várias configurações diferentes. (a) Com turbina de contrapressão como na figura 4.4.1 ou com turbina de extração/condensação em um ciclo Rankine que utiliza $0,3 \text{ kgf/cm}^2$ manométricos como apresentado na figura 4.4.3 a seguir, (b) variando as eficiências de caldeira e turbina em ambos os cenários, (c) alterando o consumo de vapor de processo, assumindo uma eletrificação da parte de preparo.

Figura 4.4.3 Configuração com turbina extração/ condensação



Fonte: Coelho (1992)

Nesta análise a definição de eficiência empregada é quantidade de energia excedente produzida pelo sistema de cogeração, independentemente se para autoconsumo ou exportação, em kWh/ tcm (quilowatt-hora/ tonelada de cana moída – na fórmula a seguir denominada de energia usina), dividido pelo potencial energético total do bagaço de cana, que no exemplo passou a ser uma constante calculada utilizando os seguintes dados extraído de Coelho 1992: (a) 265 kgb/ tcm (quilogramas de bagaço por toneladas de cana moída), (b) o poder calorífico de 2280 kcal/ kgb, (c) 860 kcal/kWh. A fórmula de eficiência é então representada por:

Fórmula da eficiência empregada:

$$\eta[\%] = \frac{100 * \text{Energia usina [kWh/tcm]} * 860 \text{ [kcal/kWh]}}{265[\text{kgb/ tcm}] * 2280 \text{ kcal/ kgb}} \quad (6)$$

$$\eta[\%] = \text{Energia usina [kWh/tcm]} * 0.14233 \text{ [tcm/kWh]} \quad (7)$$

Uma última observação antes de iniciar a leitura da tabela 4.4.1 resultado desta análise, é que os valores comerciais de caldeiras comumente encontrados no mercado não necessariamente coincidem, segundo entrevista com senhor Paletta, especialista em comercialização de turbinas a vapor para o setor sucroalcooleiro na empresa TGM turbinas, os valores típicos comerciais são caldeiras de 67 kgf/cm² manométricos com 520°C ou 530°C seguido de 100 kgf/cm² com 540°C. Quando questionado se o mesmo teria alguma indicação do porquê serem estes os valores comerciais, a resposta foi de que têm a ver com o que se pode obter de energia versus os limites metalúrgicos dos materiais das caldeiras e o respectivo valor comercial do equipamento, ou seja, uma decisão técnico- comercial. O Sr. Paletta com 14 anos de experiência no setor ainda revela estar ciente apenas de pouquíssimas instalações aonde a eficiência está ao redor de 100kWh/ tcm (tonelada de cana moída), atestando que em sua maioria, este valor está mais próximo a 50kWh/tcm, a metade.

Feitas as considerações iniciais a tabela 4.4.1 apresenta os resultados comparativos. Diversas são as observações que podem ser feitas, dentre elas (a) que a eficiência do ciclo em kWe/tcm ou em porcentagem depende da eficiência dos equipamentos envolvidos (caldeira, turbina, gerador), (b) que a automação do preparo pode reduzir o consumo de vapor de processo em até 30% (332/480), (c) que com o uso de condensador, turbina extração/ condensação e vapor de alta pressão há ganhos significativos de eficiência (14.5/8.5 = 70%), (d) Para uma mesma moagem de cana, dependendo dos equipamentos e configuração escolhida, a geração de excedente pode variar de um intervalo de 45,68 kWe/tcm até 136,06 kWe/tcm, ou seja em até aproximadamente 3 vezes de diferença. Quando observado o poder calorífico obtido e o potencial adicional pela utilização de palhas e pontas, a diferença pode alcançar a ordem de grandeza de 6 vezes. Os resultados obtidos são próximos aos relatados por Scott, Bain & Kinoshita (2002) indicam que um potencial que varia entre 20 kWh/tonelada de cana moída (tcm) e 120 kWh/tcm, pelas ações de seleção correta do ciclos, otimização no consumo de processo e opção por equipamentos com maiores eficiências.

Para fazer um contra ponto, Romão Junior (2009) chama a atenção que o aumento da pressão e temperatura do vapor têm limitações metalúrgicas, ou seja, não pode ser feito até o infinito. Isto se dá principalmente nas caldeiras pelo fato que um aumento das temperaturas internas nos tubos provoca o sobreaquecimento das superfícies expostas à altas temperaturas e radiação dos produtos

resultado da reação de combustão. Em outras palavras, é preciso respeitar os limites físicos e tecnológicos dos equipamentos, o que em algum momento também estabelece um máximo de eficiência que pode ser obtido. Romão Junior (2009) também relata que o uso de palhas e pontas em qualquer proporção também não está totalmente aceito na maioria das tecnologias de fabricação de caldeira, por questões de ordem metalúrgicas, dentre outras.

Tabela 4.4.1 Resumo do resultado da eficiência com diversas configurações

Premissas – Ciclo a vapor										
Processamento		300 tcm/h	PCI		2280 kcal/kgb		Massas	265 kgb/ tcm (Excluído palhas e pontas)		
Turbina contrapressão										
Situação	Consumo Vapor processo	Condensador	Caldeira			Pressão Processo (Manométrica)	Turbina	Gerador	Ciclo	
	[kgv/tcm]		η [%]	[Kgf/cm²]	[°C]	[Kgf/cm²]			η [%]	η [%]
1	479	Não	60	21	250	1,5	63	95	22,84	6,50
1	479	Não	85	21	250	1,5	60	95	58,36	8,50
2	479	Não	85	21	250	1,5	70	95	68,08	9,92
3	479	Não	85	21	250	1,5	80	95	77,81	11,33
Turbina extração/condensação – 0.3 kgf/cm2 para o condensador										
Situação	Consumo Vapor processo	Condensador	Caldeira			Pressão Processo (Manométrica)	Turbina	Gerador	Ciclo	
	[kgv/tcm]		η [%]	[Kgf/cm²]	[°C]	[Kgf/cm²]			η [%]	η [%]
4	332	Sim	60	60	450	1,5	63	95	85,50	12,45
5	332	Sim	85	60	450	1,5	60	95	98,21	14,30
6	332	Sim	85	60	450	1,5	70	95	114,57	16,69
7	332	Sim	85	60	450	1,5	80	95	130,94	19,07
8	332	Sim	85	80	470	1,5	60	95	101,29	14,75
9	332	Sim	85	80	470	1,5	70	95	118,27	17,21
10	332	Sim	85	80	470	1,5	80	95	136,06	19,67

Fonte: Adaptado de Coelho (1992)

Em linha com o observado na tabela 4.4.1 Santos (2012) lista que as ações de melhoria de eficiência no setor têm sido no sentido de 1) Utilização de palha como combustível das caldeiras, (2) Eletrificação dos acionamentos mecânicos, (3) Utilização de caldeiras de alta pressão e temperatura graças as tecnologias de queima do bagaço em suspensão nas caldeiras, (4) Projeto de redução do consumo específico de vapor na indústria para fabricação de açúcar e etanol.

Assim sendo fica claro o que diversos autores relatam como o potencial inexplorado de produção excedente de energia no setor sucroalcooleiro. (Machin, 2015; Coelho, 1998; Coelho, 1992; Castro et al, 2009; Bridgwater, 2012; Innocente, 2011).

Esta parte do trabalho permitiu explorar o tema de melhoria na eficiência utilizando vapor nas usinas, revendo algumas configurações típicas e ações que têm sido postas em prática, para facilitação de compreensão, a tabela 4.4.2 apresenta um quadro resumo do que foi discutido.

Tabela 4.4.2 Medidas para aumento da quantidade excedente de energia mantido o vapor como combustível

Métodos para aumento da quantidade excedente de energia – mantendo a configuração vapor
• Aumento da temperatura e pressão na saída das caldeiras • Utilização de cana de com maior poder calorífico ou terceira geração (pouco uso) • Utilização de equipamentos (caldeira, turbina, gerador, bomba) com maiores eficiências • Emprego ciclos com condensação • Utilização de variações do ciclo Rankine, tais como com sobreaquecimento, com reaquecimento, ou regenerativo • Ações de redução de consumo de vapor no processo, como eletrificação de moendas com uso de inversores de frequência • Utilização de turbinas do tipo extração- condensação • Queima de palhas e pontas

Fonte: Elaboração Própria

Com este panorama geral de como ocorre o processo de cogeração nas usinas de açúcar e álcool elencando fatores de aumento de eficiência, cumpre-se o objetivo deste item do trabalho.

Como a proposta está em avaliar a gaseificação no setor sucroalcooleiro, sobre gaseificação dedica-se o trabalho a partir deste ponto.

4.0 TECNOLOGIAS MAIS EFICIENTES EM DESENVOLVIMENTO

4.1 Definição De Gaseificação

Nesta seção é revisto o processo de gaseificação, bem como se analisa a importância do tema para o setor de energia. Na verdade, há várias formas de se definir o conceito de gaseificação.

IEA (2018) define gaseificação como a quebra térmica completa das partículas de biomassa, que ocorre dentro de um reator fechado chamado de gaseificador, na presença de um agente oxidante (ar, oxigênio, CO₂, etc.), resultando em três itens: (a) Um gás combustível, (b) componentes voláteis e (c) cinzas. Para tanto o agente oxidante deve ser acrescido ao reator abaixo da relação estequiométrica. IEA (2018) ainda relata que trata-se de um estágio intermediário entre pirólise e a combustão, com o resultado dependendo fortemente do combustível (sua composição, conteúdo de umidade, granulometria), do agente oxidante (ar, oxigênio, vapor, ou mistura de vapor com oxigênio), do gaseificador, das temperaturas e das pressões envolvidas.

Segundo GSTC (2018), o processo de gaseificação é o que utiliza um reator chamado de gaseificador, onde ocorre a conversão de um combustível (hidrocarbonetos) em um gás, chamado gás de síntese, também conhecido como syngas, abreviação do inglês de *synthesis gas* (composto basicamente de, composto de CO, H₂, CO₂, CH₄, segundo os mesmos). O combustível básico pode ser carvão, ou biomassa, entre outros. Tem a vantagem de não ser um processo de combustão, e portanto, essencialmente menor emissor de partículas nocivas ao meio ambiente.

Ainda segundo o mesmo autor, a gaseificação ocorre pela reação de combustão incompleta, no presente caso, do bagaço de cana. Estes hidrocarbonetos têm suas ligações químicas quebradas e produzem o gás dentro de um gaseificador, oxidados parcialmente com oxigênio e/ou ar em determinada temperatura e pressão. Adicionalmente, sistemas de limpeza são adicionados ao escape para remover minerais e particulados, como é comum nos casos de biomassa, além de gás sulfídrico e mercúrio, presentes quando se utiliza carvão.

Para o caso do bagaço de cana de açúcar, Coelho (1992) lista diversas vantagens desta biomassa em relação ao carvão, dentre elas: (a) O gás formado a partir do bagaço não apresenta enxofre em sua composição, (b) possui alta volatilidade, (c) baixa temperatura de conversão. Por outro lado, a autora também aponta as desvantagens de (a) baixa densidade e (b) difícil manuseio.

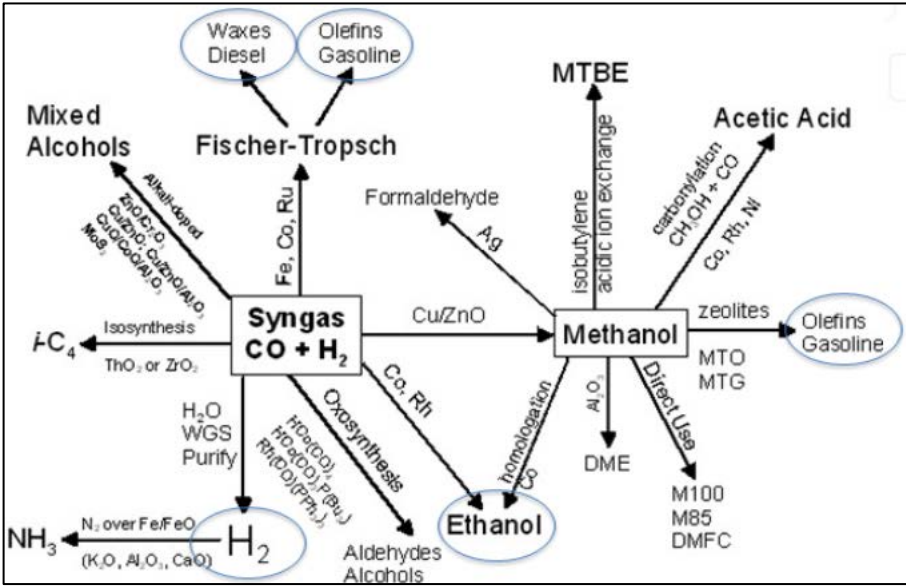
Scott, Bain & Kinoshita (2002) definem gaseificação do bagaço de cana (os autores foram os responsáveis pela única planta de gaseificação a bagaço de cana de grande porte de que se tem

notícia no mundo, em Mauí, Havaí, EUA) como a conversão de um material orgânico sólido em uma mistura de gases (o syngas), vapor orgânico, vapor de água e resíduos sólidos.

Ett & Landgraf (2012) ressaltam que este gás pode ser alimentado em uma turbina a gás para produzir eletricidade, ou pode passar por um processo de transformação em biocombustíveis como biodiesel e metanol ou bioprodutos como amônia e hidrogênio (síntese de Fischer Tropsch). A Figura 4.5.1. apresenta os diferentes produtos possíveis de serem obtidos (Ett & Landgraff, 2012).

Van der Meijden (2010) aponta que a tecnologia de gaseificação para produzir combustíveis líquidos ou gasosos a partir da biomassa vem ganhando um novo impulso, uma vez que se mostra como uma alternativa sustentável de produção de energia. Embora não seja a pauta do presente trabalho, fica claro que com a gaseificação do bagaço de cana de açúcar há a alternativa de se obter biocombustíveis, além da possibilidade de produção de energia térmica e elétrica.

Figura 4.5.1. Produtos possíveis de serem obtidos a partir do syngas



Fonte: Ett & Landgraf (2012)

Ett & Landgraf (2012) comentam a escalabilidade de projetos de produção de gás de síntese, considerando, como ilustrado na tabela 4.5.1, que para pressões de operação do gaseificador a partir de 40-50 bar, não se faz necessária uma energia adicional para compressão de gás de síntese, o que as tornaria economicamente mais atrativa que projetos em menor escala. Entretanto, sabe-se que, a partir da experiência em Mauí, a grande dificuldade é a operação de gaseificadores pressurizados, como será discutido a seguir neste trabalho.

Tabela 4.5.1 Exemplos de consumo energético para produção de gás de síntese

		Pressão do gaseificador 5 bar	Pressão do gaseificador 50bar

Energia de bombeamento de alimentação	35.450 kg/h	0,03 MW	0,09 MW
Compressão de oxigênio	21.120 Nm ² /h	2,85 MW	4,87 MW
Compressão de gás de síntese	100.000Nm ³ /h	19,7 MW	0,00MW
		22,58MW	5,06MW

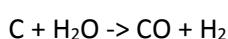
Fonte: Adaptado de Ett & Landgraf (2012)

Castro et al (2009) menciona que as reações de pirólise, combustão e gaseificação são similares, e que uma maneira de se diferenciar estes processos é o fato de que na pirólise não há um agente oxidante, enquanto que na combustão há oxigênio em excesso, e na gaseificação o oxidante está em quantidade inferior à estequiométrica, produzindo por este motivo H₂ e CO, que são os elementos básicos do syngas.

De acordo com Machin (2015), o termo gaseificação significa conversão da biomassa sólida em um gás combustível que ainda contém calor sensível, ao passo que na combustão o calor sensível é exaurido. Quando consideramos o caso do bagaço de cana e o agente gaseificante ou oxidante é o ar, o poder calorífico inferior (PCI) fica em torno de 4 a 7 MJ/Nm³; entretanto em se utilizando oxigênio ao invés de ar este atinge valores que ficam entre 10 a 18 MJ/Nm³ (somente como referência o PCI do gás natural está em torno de 40 MJ/Nm³). Scott, Bain & Kinoshita (2002) apresentam valores semelhantes. Ainda segundo Machin (2015), a reação utilizando ar oxidante ocorre entre 500-600K, enquanto que quando se emprega oxigênio entre 1000 e 1200K.

Coelho (1992) descreve o processo de gaseificação como uma pirólise seguida da oxidação do carbono. Na pirólise há a decomposição do combustível por efeito do calor produzindo coque, água, produtos solúveis (ácido pirolenhoso), alcatrões (insolúveis) e gases (hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrogênio).

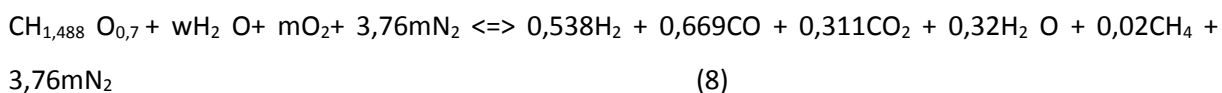
Durante a oxidação do carbono (coque) a monóxido de carbono ocorre o craqueamento de produtos solúveis e insolúveis, tendo como fundamental a reação endotérmica a seguir (com absorção de energia do meio externo), com um conteúdo médio de 25% e 15% respectivamente.



O agente oxidante pode ser oxigênio ou ar, sendo que se obtém maior poder calorífico com oxigênio. Entretanto, pelos custos envolvidos em construir uma planta de produção de oxigênio, o processo com oxigênio se torna financeiramente inviável; por este motivo, opta-se pelo ar, cujo o uso resulta em um gás com relativamente alta concentração de água, o que obriga a utilização de um purificador ou de uma etapa de limpeza antes da inserção do gás na câmara de combustão da turbina, quando esta é empregada para produção de energia elétrica. Há também a possibilidade de

utilização de motor a combustão interna – MCI, mas a vantagem do uso da turbina a gás é a possibilidade de utilizar os gases de exaustão para geração de vapor a ser alimentado numa turbina a vapor (o chamado ciclo combinado).

Em termos químicos, a composição básica do bagaço seco conforme Machin (2015) é dada por $\text{CH}_{1,488}\text{O}_{0,7}$. Segundo Proenza Perez et al. (2014), a gaseificação do bagaço usando ar como oxidante, em altas temperaturas (entre 500 e 600K) pode ser descrita esquematicamente pela equação (8) a seguir. Machin (2015) ainda destaca que esta reação produz alcatrões, o que é negativo para motores a combustão interna, mas que aumenta o PCI do combustível e portanto se trata de um efeito positivo de se obter mais energia para aplicações utilizando turbinas. Se o alcatrão for mantido na fase gasosa, este fato ocorre; mas a temperaturas menores, o alcatrão se condensa e deve ser retirado para não danificar o sistema da turbina a gás.



Machin (2015) apresenta as características do gás de síntese para uso em motores de combustão interna que foram padronizadas em 2001, devendo respeitar os limites expostos, conforme mostra a tabela 4.5.2 a seguir.

Tabela 4.5.2 Características do gás de síntese para uso em motores a 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: Machin (2015)

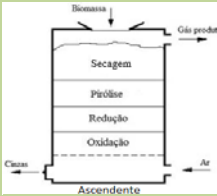
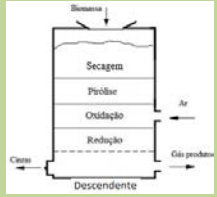
4.2 Tipos de gaseificadores

Existem fundamentalmente três tipos de gaseificadores (Machin, 2015; Coelho, 1992):

- O gaseificador de leito fixo,
- O gaseificador de leito fluidizado, e
- O gaseificador por fluxo de arraste.

As tabelas 4.6.1, 4.6.2 e 4.6.3 apresentam um resumo das principais características de cada tipo, com dados agregados de diferentes estudos (Machin, 2015; Coelho, 1992, Van der Mijden, 2010, Soares, 2012 e Ett, 2014).

Tabela 4.6.1 Gaseificadores de leito fixo

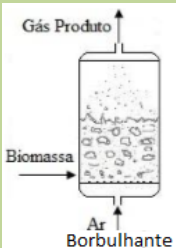
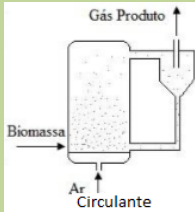
Gaseificadores de leito fixo		
Leito fixo Subdividido em fluxo ascendente ou descendente. Em inglês fixed bed, updraft or downdraft.	* De temperatura média (normalmente 700-1200°C); * Opera em modo seco portanto as cinzas não atingem ponto de fusão; * Normalmente utilizam o ar como agente gaseificador; * Pouco adequado ao uso com biomassa por produzir um razoável teor de nitrogênio; * Sistema de controle fácil de operar; * Conversão de carbono 80-90%; * Entrada de biomassa por cima, entra e saída de gás, ar e cinzas nas laterais; * Apresenta bons resultados com o combustível carvão; * Pirólise dentro do gaseificador ocorre por contracorrente do gás; * Syngas sai a uma temperatura normalmente entre 500-600°C;	
		<u>Descendente</u> * Utilizados em pequena escala (1 a 5MWth); * Requerem umidade do combustível ao redor de 20% com alta densidade; * Requerem uniformidade do combustível - peletização; * Não adequado para escala industrial; * Baixo nível de alcatrão produzido;
		<u>Ascendente</u> * Menos sensível que o descendente a variação de umidade do combustível; * Boa eficiência; * Permite escala industrial (<20MWth); * Existem casos em operação utilizando biomassa como combustível; * Nível de alcatrão alto;

Fonte: Elaboração Própria

A tabela 4.6.1 permite observar que, caso seja utilizado para bagaço de cana de açúcar, o gaseificador de leito fixo irá requerer um processo de limpeza, peletização e retirada de nitrogênio, em vista das características de granulometria do mesmo (baixa densidade e tamanho irregular). Embora o gaseificador de leito fixo de fluxo tenha sido um dos primeiros a ser desenvolvido, por ser mais simples de se construir e operar, este possui ainda a desvantagem de aplicação somente para potências relativamente baixas.

A próxima tabela 4.6.2 apresenta de forma resumida as características coletadas dos gaseificadores do tipo leito fluidizado.

Tabela 4.6.2 Gaseificadores de leito fluidizado

Gaseificadores de leito fluidizado		
Leito Fluidizado Subdividido em borbulhante e circulante. Em inglês fluidized bed, bubbling or circulating.	* De temperatura média (Normalmente entre 800 e 900°C, produzindo um gás com poder calorífico de 4 a 7 MJ/Nm³) * Produzem um gás livre ou pobre em nitrogênio; * Temperatura uniforme na região de gaseificação (vantagem versus leito fixo); * Maior velocidade de ocorrência da reação (em relação ao leito fixo); * Biomassa pela lateral, ar por baixo, saída de gás por cima; * Nível de produção de alcatrão intermediário; * Sistema permite melhor controle de temperatura e taxas de reação; * Menos sensível a uniformidade do combustível (em relação ao leito fixo); * Utilizam um material inerte no leito, podendo ser areia, cinza ou um material cataliticamente ativo como dolomita ou oliniva; * Conversão de carbono 80-95% * Problemas de desgaste da parede interna pela alta velocidade do fluido; * Syngas de saída com temperaturas entre 800-1000°C;	
		<u>Borbulhante</u> * Mais antigo; * Granulometria <50-150mm; * Umidade 10-55%; Preferivelmente <30%; * Capacidade de 10-50MWth; * Velocidade que o material atravessa o leito >3 m/s;
		<u>Circulante</u> * Granulometria <20mm; * Umidade 5-60%; Preferivelmente <30%; * Capacidade de 30-100MWth; * Também disponível com leito duplo; * Velocidade que o material atravessa o leito 7-10 m/s; * Há projetos comerciais com biomassa em operação; * Há também uma grande proporção de instalações de biomassa desativada com esta instalação;

Fonte: Elaboração Própria

A tabela 4.6.2 permite observar que o leito fluidizado é mais adequado à utilização do bagaço de cana de açúcar como combustível, isto por produzir menos nitrogênio, ser adequado à granulometria típica do bagaço e ser capaz de trabalhar com sua umidade padrão (em torno de 50%). Considerando os dois tipos de gaseificadores de leito fluidizado, o tipo circulante parece ser o mais favorável pela menor sensibilidade a variações, e maior capacidade de potências.

Há também duas outras classificações de gaseificadores de leito fluidizado, com relação à pressão de operação: os gaseificadores atmosféricos e fluidizados. Os gaseificadores atmosféricos podem ser de operação mais fácil mas há necessidade de compressão do gás de síntese para alimentação na câmara de combustão da turbina a gás, o que reduz a eficiência global do ciclo. Os gaseificadores

pressurizados têm a vantagem de não necessitar a compressão do syngas e podem apresentar melhor eficiência global, mas podem apresentar dificuldades importantes de operação. As instalações empregando este tipo de gaseificador que tiveram sua operação interrompida, a citar por exemplo a planta de Maui no Havaí, onde não houve dificuldades de alimentação do bagaço no gaseificador e na limpeza do gás antes da alimentação na turbina à pressão de saída do gaseificador (aproximadamente 20 bar). A empresa Westinghouse fez experiências com filtros cerâmicos, mas estes trincaram. Coelho (1998) analisa que este foi o único projeto de maior escala para gaseificação do bagaço de cana de açúcar. Em nossa pesquisa, também não foi encontrada outra referência no mundo.

A tabela 4.6.3 apresenta o quadro resumo das características dos gaseificadores do tipo fluxo de arraste, um dos modelos com maior aplicação para geração de energia, mas até então utilizando apenas carvão como combustível e oxigênio como agente oxidante.

Tabela 4.6.3 Gaseificadores por fluxo de arraste

Gaseificadores por fluxo de arraste	
Fluxo de arraste arraste. Em inglês entrained flow 	* De temperatura interna alta (Normalmente entre 1200 e 1500°C) * Na maioria das vezes pressurizado à oxigênio, gerando um gás com poder calorífico entre 10 a 18 MJ/Nm³; * Combustível pode ser injetado junto com oxigênio, ou mistura de vapor de água com oxigênio, ou com ar; * Baixo teor de alcatrão de saída, tendendo a isento; * Baixo teor de metano e hidrocarbonetos pesados; * Utilizado em potências maiores; * Requer teores de umidade entre 10 e 20%; * Requer granulometrias baixas – quase que pulverizado $\approx 100\mu\text{m}$; * Temperatura do gás de saída 1300- 1700 °C; * Taxa de conversão de carbono >95%; * Mais eficiente dos três na produção de gás de síntese; * Tecnologia consolidada por operar com carvão, ex. Shell, General Electric, Texaco e Siemens, para até 2000 t/dia; * O gaseificador opera a uma temperatura para manter as cinzas na fase líquida, e estas são condensadas durante a limpeza; * Tem sido selecionado nos novos projetos de biomassa nos Estados Unidos e Europa; * Possui uma região de coleta de escória; * Capacidade de trabalhar com fluidos líquidos ou sólidos de baixa granulometria (como o bagaço de cana);

Fonte: Elaboração Própria

A partir da tabela 4.6.3 é possível inferir algumas observações em relação ao gaseificador por fluxo de arraste: este gaseificador é o de produção maior quantidade de energia pelas temperaturas e pressões que trabalha, mas demandando obrigatoriamente a pressurização por oxigênio. Tem a vantagem de ser uma tecnologia consolidada para produção de energia elétrica com utilização nas

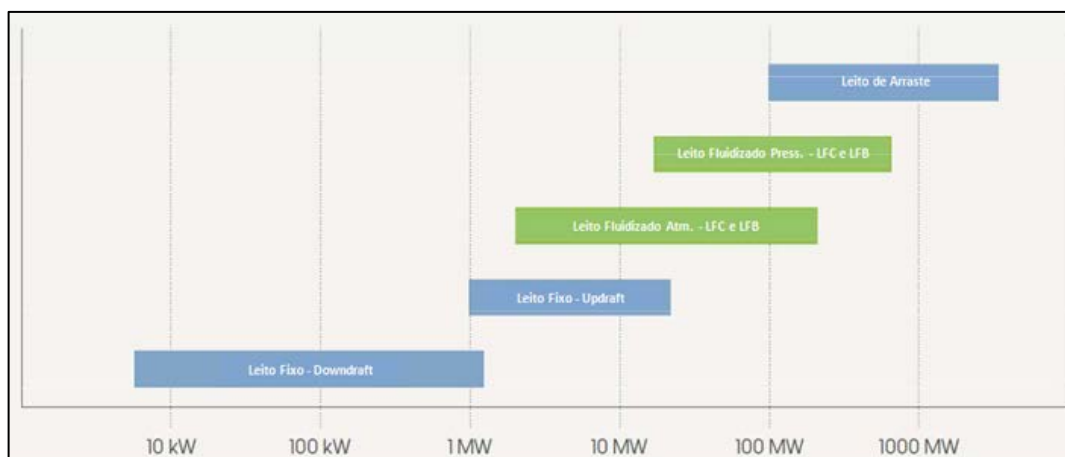
térmicas a carvão. Entretanto, caso se opte pelo seu uso com o bagaço de cana de açúcar será necessário um pré-tratamento para redução de umidade e granulometria, além de uma planta para produção de oxigênio, com impactos importantes na viabilidade econômica do projeto. Segundo Ett (2014) este tem sido este o tipo empregado em alguns projetos de biomassa de madeira nos Estados Unidos.

Segundo Scott, Bian & Kinoshita (2002) os gaseificadores empregados para biomassa possuem um rendimento que varia entre 70 e 80%, operam em uma temperatura entre 700 e 850° C, e na maioria das experiências com biomassa são de leito fluidizado, seja ele borbulhante ou circulante.

Soares (2012) apresenta os diferentes intervalos de potência típicos de cada de gaseificador. Em seu trabalho a opção por fluxo de arraste passa a ser aplicável somente em casos aonde as potências ultrapassem 100MW, como ilustrado na figura 4.6.1.

Entretanto, pela experiência do projeto Cuba GEF/ Unido se pode afirmar os gaseificadores de leito fixo não apresentam desempenho adequado acima de 200 kW [IEA 2018].

Figura 4.6.1 Intervalo de potências típicos dos gaseificadores



FONTE: Soares (2012)

Complementarmente, a tabela 4.6.4 a seguir apresenta os dados de composição do gás produzido de acordo com o gaseificador.

Tabela 4.6.4 Intervalo típico de composição dos gases conforme o gaseificador

Componente		Agente gaseificador: Ar	Agente gaseificador: O ₂	Agente gaseificador: Vapor
		Leito Fixo	Fluxo de arraste	Leito Fluidizado
CO	Vol. [%]	13-18	45-55	25-30
CO ₂	Vol. [%]	12-16	10-15	20-25
H ₂	Vol. [%]	11-16	23-28	35-40
CH ₄	Vol. [%]	2-6	0-1	9-11
N ₂	Vol. [%]	45-60	0-1	0-5
Poder calorífico	Vol. [%]	4-6	10-12	12-14

Fonte: IEA (2016)

Ett (2014) ainda lembra que os gaseificadores fazem parte de uma tecnologia cuja produção se iniciou antes do ano de 1800 e já passou por 3 ou 4 diferentes gerações de desenvolvimento, listando ao menos 15 fabricantes consolidados internacionalmente e defendendo que existem tecnologias e opções. O autor também argumenta que, além dos aspectos básicos considerados nas tabelas 4.6.1, 4.6.2 e 4.6.3, a seleção de um gaseificador requer uma cuidadosa análise dos critérios expostos na figura 4.6.1 a seguir, como:

- (a) Classificação da pressão e temperaturas de trabalho,
- (b) confirmação da granulometria média e sua uniformidade,
- (c) Definição do número de estágio,
- (d) Seleção do tipo de parede do gaseificador,
- (e) Classificação detalhada do oxidante, etc.

Figura 4.6.2 Critérios mínimos para a seleção de um gaseificador

Pressão de operação	• Pressurizado • Trabalho á pressão atmosférica
Temperatura de operação	• Intervalo de temperatura • Velocidade e constância
Grau de gaseificação	• Total • Parcial
Combustível	• Bagaço de cana • Carvão • Resíduo urbano, etc
Granulometria	• Média • Uniformidade e constância
Oxidante	• Ar • Oxigênio • Mistura
Número de estágios	• Respeitando o balanço de massas
Tipo de parede do gaseificador	• Conforme propriedas físico-químicas envolvidas
Sistema de Limpeza	• Sim (Qual o mais adequado?) • Não

Fonte: Adaptado de Ett (2014).

Segundo Machin (2015) o bagaço de cana de açúcar apresenta um aspecto positivo quanto à sua utilização em gaseificadores pelo fato de possuir teor de álcalis, na ordem de 0,06 kg/GJ; ainda assim, só há risco de incrustação e perda de eficiência no gaseificador quando este índice é acima de 0,17 kg/GJ. A autora analisa ainda que isto é bom tanto para a durabilidade e uniformidade de performance do gaseificador quanto da turbina, apontando ainda que caso haja algum processo de limpeza entre o gaseificador e a turbina, este não precisa se preocupar na retirada de álcalis como sódio e potássio, por exemplo, uma demanda corrente quando se emprega outras biomassas que não bagaço de cana de açúcar.

Coelho (1992) analisa o gaseificador de leito fluidizado do tipo circulante como o mais adequado, por este permitir a utilização de bagaço de cana de açúcar *in natura* após secagem. Outrossim, o estudo não explora a opção por fluxo de arraste, assumindo que se trata de tecnologia de maior custo, indicado para potências mais altas, e dedicado ao carvão, argumentos bastante válidos para a época. Entretanto, observa-se mudanças na condição de operação dos produtos e a existência de tecnologias produzidas nos últimos 25 anos. Em tempos atuais, a experiência de desativação de

algumas unidades utilizando gaseificador do tipo leito fluidizado também indicam a necessidade de uma análise mais profunda.

Machin (2015) elabora seu estudo optando por um gaseificador de fluxo de arraste segundo o modelo CHOREN baseando-se em três argumentos principais:

- (a) Descontinuidade operacional de diversas instalações que utilizavam leito fluidizado ao redor do mundo;
- (b) Possibilidade de obter gás de melhor qualidade com baixo teor de alcatrão e metano;
- (c) Por permitir trabalhar com altas pressões e altas potências, que se reflete em uma maior capacidade de geração de energia, embora que para isto se demande mandatoriamente a realização de um pré-tratamento do bagaço e palha combustíveis para adequação do combustível as condições de uso;

Como método de pré-aquecimento Machin (2015) opta pela torrefação, defendida pela autora por que com isso:

- a) Se diminui sensivelmente a velocidade de decomposição do bagaço, permitindo até maior tempo de estocagem;
- b) Praticamente elimina-se o risco de formação de odores e o perigo de autoignição quando estocado;
- c) Reduz-se as dimensões e umidade adequando-se as demandas do gaseificador;
- d) Aumenta-se a densidade energética do bagaço (PCS em média de 15,4 a 20,4 MJ/kg);
- e) E fundamentalmente, torna possível utilizar para bagaço em gaseificadores com tecnologia consolidada para produção de energia, projetados inicialmente à utilização do combustível carvão;

Há de se destacar entretanto, que conforme consta em IEA (2018), os três projetos de gás de síntese realizados pela empresa CHOREN na Alemanha foram descontinuados por razões técnicas não esclarecidas, e que a empresa passou por um processo de falência.

Em relação à turbina a gás, Coelho (1998) chama a atenção ao detalhe de que quando empregada, essa deve requerer alguns cuidados a serem tomados para adequar a qualidade do syngas produzido aos seus limites físico-químicos necessários, ressaltando como que obrigatório e complexo um estágio intermediário de limpeza. Além disso a autora comenta que o teor físico-químico do gás de escape para a atmosfera pode também demandar um outro estágio de limpeza, agora para atendimento da legislação ambiental ou simplesmente redução na emissão de poluentes.

Com estas últimas observações, e após ter explorado diversos aspectos referente aos tipos, características, seleção e aplicações de gaseificadores, fazendo jus a sua importância no processo, se tem como atingido os objetivos do presente subitem.

4.3 Ciclo Brayton e Ciclo Combinado

Dando sequência à discussão do processo de produção de energia elétrica por gaseificação/turbinas a gás, a seguir são apresentados os detalhes técnicos das turbinas a gás e o seu ciclo, o Brayton, seguido observação das funcionalidades do ciclo-combinado. Não se pretende fazer um estudo aprofundado, e sim apresentar os ciclos e algumas de suas características consideradas importantes para o conteúdo deste trabalho.

Em um estudo sobre eficiência energética, o objetivo é a obtenção de mais energia térmica/elétrica a partir da mesma quantidade de cana moída, de forma a permitir a maior geração de excedentes de eletricidade.

Coelho (1992) defende como vantagem das turbinas a gás aspectos como (a) o fato de serem normalmente construídas em conjuntos modularizados que permitem fácil desmontagem, montagem, transporte e reparo; e (b) serem uma tecnologia consolidada com centenas de unidades instaladas operando utilizando como combustível o gás natural ao redor do mundo, incluso locais de alta periculosidade e umidade como plataformas de petróleo fixas ou flutuantes, por exemplo.

O fabricante GE (General Electric)¹, um dos líderes globais na fabricação, instalação, operação e manutenção de turbinas a gás, analisa a existência dos dois tipos de turbinas a gás:

- as turbinas a gás aeroderivadas
- as turbinas a gás chamadas *heavy duty*.

As primeiras foram desenvolvidas inicialmente para aplicações aeronáuticas e depois adaptadas à produção de energia elétrica na indústria. São mais novas e portanto mais modernas, eficientes e mais leves que as segundas.

Quando se utiliza como combustível o gás de síntese em lugar do gás natural, há uma série de aspectos que tornam esta substituição não tão simples quanto possa parecer, como por exemplo

- (a) O poder calorífico do gás de síntese é menor do que o gás natural,
- (b) A umidade do bagaço é relativamente alta (50%),

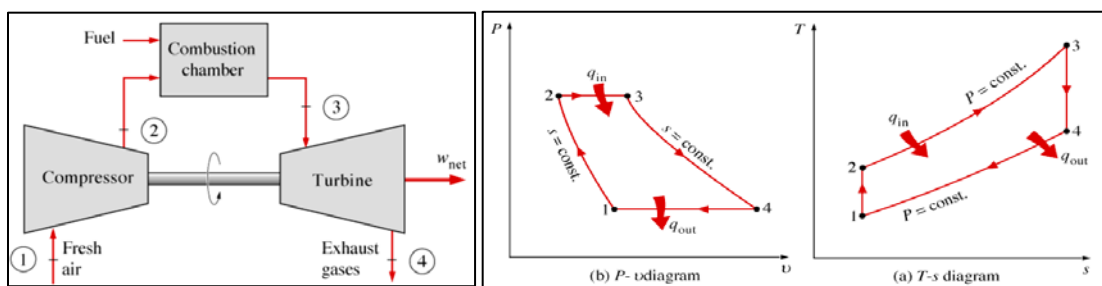
¹ Informação pessoal de Thiago Coelho, especialista com mais de 15 anos de experiência na área

(c) As propriedades físico-químicas de ambos são distintas, o que influencia não só na performance mas também na durabilidade da turbina.

Estes aspectos, entre outros, obrigam ao fabricante da turbina a realizar adaptações metalúrgicas construtivas para obtenção de um bom desempenho e de durabilidade em seus equipamentos. Significa também que se impõem exigências mínimas de propriedades para que o gás de síntese seja adequado a utilização com determinada turbina. Segundo a informação recebida, os últimos projetos da GE na área, bem como os esforços em pesquisa e desenvolvimento têm sido realizados empregando turbinas do tipo *heavy duty*, pois estas possuem maiores tolerâncias e robustez, adaptando-se melhor aos combustíveis derivados de biomassa.

Além da forma construtiva e das exigências específicas para utilização do *syngas*, vale notar que as turbinas a gás operam no ciclo Brayton, um ciclo baseado em um fluido de trabalho que não apresenta mudança de fase no processo, ou seja, está a todo tempo em sua fase de gás (Romão Junior, 2009). Estes sistemas são constituídos por um compressor (para o ar de combustão), uma câmara de combustão, e um expensor ou a turbina propriamente dita, além do gerador que se acopla à turbina, conforme ilustrado na figura 4.7.1.

Figura 4.7.1 Representação esquemática do ciclo Brayton simples



Fonte: Adaptado de Nascimento & Lora 2004

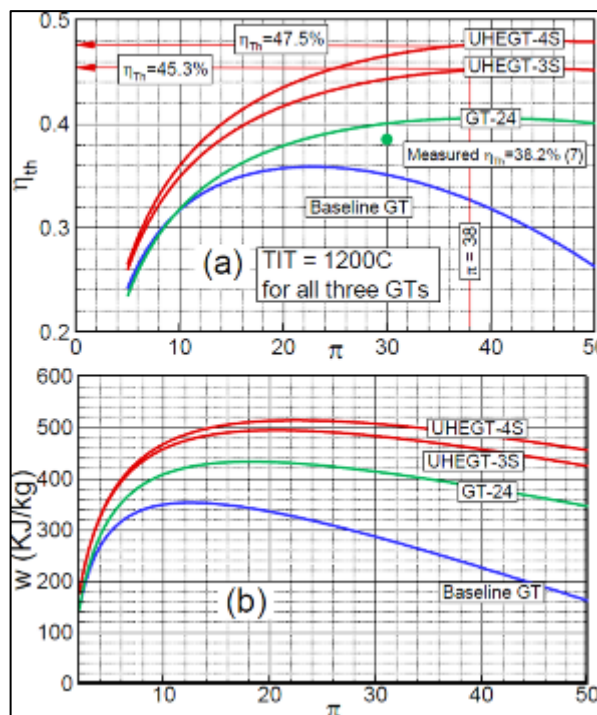
O ar de entrada (*fresh air*) é inicialmente comprimido, aumentando sua temperatura e pressão, sendo depois alimentado na câmara de combustão onde reage com o combustível (fuel). Na saída da câmara de combustão, os gases atingem temperaturas que ultrapassam a 1000- 1200°C. com alta temperatura e alta entalpia, estes gases são então expandidos na turbina produzindo trabalho (w_{net}), sendo os gases de exaustão enviados ao ambiente ou aproveitados para geração de vapor (ciclos combinados).

Na mesma figura também são apresentados os diagramas de pressão versus volume específico e temperatura versus entropia específica de um ciclo Brayton ideal.

No ciclo brayton a eficiência é influenciada pela taxa de compressão, que é a relação entre a pressão de saída e a pressão de entrada no compressor. A figura 4.7.2 ilustra o comportamento típico de eficiência e potência de uma turbina gás em ciclo brayton. No eixo horizontal se encontra a taxa de compressão π e, no vertical, o rendimento (gráfico superior) ou a potência (gráfico inferior). As diversas curvas coloridas são obtidas pela relação entre as temperaturas da saída da câmara de combustão e a temperatura de entrada de ar no compressor, respectivamente os pontos de temperatura mais alto e mais baixos do ciclo, que influenciam a eficiência e a potência extraída da turbina.

Coelho (1992) discute as diferenças entre turbinas a gás aeroderivadas, com potências da ordem de 40MW e razão de compressão de até 30 vezes, e as *heavy duty* que atingem até uns 180MW, mas com razões de pressão entre 10 e 16.

Figura 4.7.2 Turbina a gás – Exemplo de rendimento térmico (curva superior) e curva de trabalho específico líquido (curva inferior), ambas em função da taxa de compressão.



Fonte: Adaptado de Nascimento & Lora 2004

Coelho (1992) ANALISA que, embora teoricamente a eficiência da turbina a gás SEJA maior DO que nas turbinas a vapor, na condição de operação com GÁS DE SÍNTESE, a exaustão da turbina muitas vezes ainda possui gases em alta temperatura (500-600°C), o que significa um ponto de operação com um rendimento que acaba sendo menor.

Para que o processo seja mais eficiente É necessário A INTRODUÇÃO DE um ciclo combinado com o Brayton-Rankine. Isto significa que, após o ciclo Brayton, a exaustão da turbina a gás alimenta uma

caldeira de recuperação, produzindo vapor superaquecido, e este vapor alimenta uma turbina no ciclo Rankine. Assim, como ilustrado por Simões Moreira (2017) um ciclo Brayton de 40%, e um ciclo Rankine de 25% resultarão em um ciclo combinado com eficiência de 55%.

Portanto, para aumentar a eficiência no processo de gaseificação do bagaço de cana de açúcar se empregada o chamado igcc – do inglês *integrated gasification combined cycle*, ou ciclo combinado com gaseificação, com uma ou mais turbinas a gás que passam a ser integradas a um ciclo a vapor. GSTC (2018) informa que em Indiana e na Florida, nos estados unidos, há 18 plantas em operação comercial utilizando este sistema tendo como combustível a biomassa.

Coelho (1992) ainda destaca que por Carnot ciclos combinados poderiam atingir até 62% de eficiência, encontrando na época casos reais com rendimento médio de 52%. A figura 4.7.3 ilustra um ciclo combinado. Os gases de exaustão do ciclo brayton não são enviados para a atmosfera, como foi descrito anteriormente, mas circula por uma caldeira de recuperação (em inglês, *hrsg/heat recovery steam generator*). Nesta caldeira de recuperação, os gases são utilizados para produção DE vapor superaquecido que alimenta a turbina A VAPOR, em um ciclo Rankine.

Na mesma figura HÁ uma representação em uma maquete de uma usina real, com duas turbinas a gás e uma a vapor. Existem certamente outros ciclos possíveis utilizando a turbina da gás como por exemplo o ciclo com regeneração aonde o gás de saída da turbina passa por uma caldeira de recuperação E é utilizado para aumentar a temperatura gás de saída do compressor, diminuindo o consumo de combustível. HÁ AINDA a configuração STIG (steam injected gás turbine ou turbina gás com injeção de vapor), onde também se instala uma caldeira de recuperação na saída da turbina a gás, mas agora o VAPOR produzido é injetado diretamente na câmara de combustão.

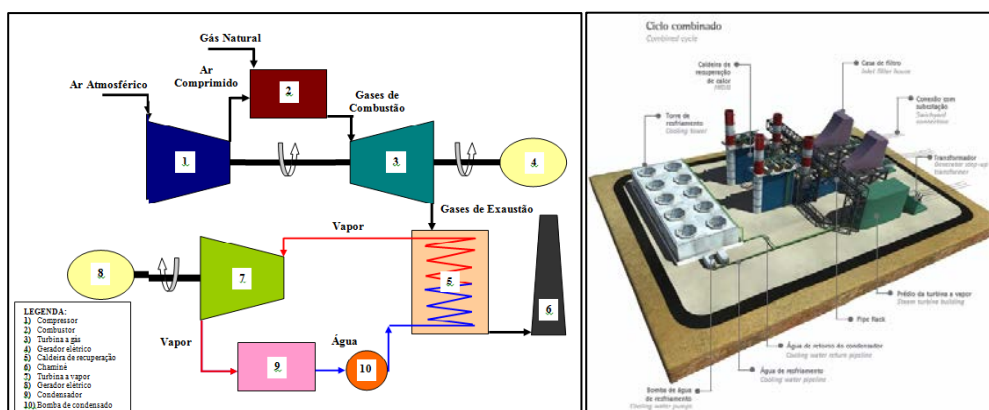


Figura 4.7.3
Exemplo de
ciclo
combinado
Brayton-
Rankine

Fonte: Adaptado de Nascimento & Lora 2004

A seguir serão analisadas as eficiências esperadas em caso se deseje utilizar esta tecnologia em usinas de açúcar e álcool.

4.4 Eficiências do Ciclo Combinado com Gaseificação do Bagaço

Coelho (1992) avaliou o potencial de geração de eletricidade por tonelada de cana moída (kWe/tcm) em uma usina de açúcar e álcool, para diversas configurações, conforme ilustrado na tabela 4.8.1. Para todas as simulações o consumo no vapor do processo foi mantido, de forma a garantir as necessidades de consumo de energia térmica da usina. Os resultados obtidos são próximos aos apontados por Scott, Bain & Kinoshita (2002), indicando que ciclos combinados com gaseificação de bagaço de cana podem gerar aproximadamente 240 kWe/tonelada de cana moída.

Tabela 4.8.1 Eficiências estimadas para ciclos com gaseificadores de leito fluidizado (não pressurizados e utilizando ar).

Processamento		300 tcm/h		Massas		265 kgb/ tcm (Excluído palhas e pontas)		
Situação	Consumo Vapor processo	Ciclo	Gaseificador	Pressurizado	Oxidante	Pressão Processo (Manométrica)	Gerador	Ciclo
	[kgv/tcm]					[kgf/cm ²]	η [%]	kWe/tcm
1	332	GTCC mantendo sistema existente	Leito fluidizado	Não	Ar	1,5	95	70,03 (+19%)
2	332	GTCC	Leito fluidizado	Não	Ar	1,5	95	225 (+37%)
4	332	STIG	Leito Fluidizado	Não	Ar	1,5	95	268 (+45%)

Fonte: Adaptado de COELHO 1992

A partir de Machin (2015) e Ett (2014) se elaborou - como apresentado nos apêndices- um cálculo considerando um sistema gaseificado por fluxo de arraste, com preparação por pré tratamento de torrefação, onde foi alcançado um rendimento maior, da ordem de 40%. Ernesto (2009) também elaborou uma análise sobre o tema, e estima que, em situações de fluxo de arraste, haja um ganho líquido da ordem de 35 a 40%, semelhante ao foi obtido por Machin (2015).

Assim sendo, com base na revisão literária e nos cálculos apresentados no apêndice, se pode esperar ganhos energéticos próximos a 20% quando a gaseificação é realizada agregando-se o sistema de gaseificação/turbina a gás a sistemas a vapor existentes, e 40% em caso de sistemas completamente novos. Ficam claras as vantagens energéticas que se pode obter, apesar de que o processo de gaseificação do bagaço ainda encontra desafios tecnológicos. Isto parece ser confirmado pela desativação de várias plantas de gaseificação de biomassa no mundo [IEA. 2018].

Portanto, é necessário aprender com as experiências realizadas, como discutido a seguir.

5.0 EXPERIÊNCIAS EXISTENTES E LIÇÕES APRENDIDAS COM A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Tanto Machin (2015) quanto Ett (2014) relataram que gaseificadores são produzidos desde os anos 1800. Por outro lado, embora estudada há mais de 30 anos, a gaseificação de biomassa continua sendo uma tecnologia promissora mas não totalmente dominada, o que é ilustrado pelas diversas plantas cujas atividades foram encerradas por dificuldades técnicas e operacionais, como aponta IEA (2018). Quando se trata de gaseificação de bagaço *in natura* o problema parece ser mais complexo, uma vez que não foi encontrado nenhum experimento, seja ele protótipo ou não, bem sucedido e que esteja em operação. Assim sendo busca-se aqui avaliar aqui um pouco das referências de plantas que aplicaram ou aplicam gaseificação de biomassa, de modo a elaborar uma lista de lições aprendidas.

5.1 Situação Atual – Lições Aprendidas

GSTC (2018) destaca que há aplicações com mais em operação há mais de 50 anos produzindo syngas para a fabricação de hidrogênio, vapor e outros, além de eletricidade. Relata ainda diversas instalações em refinarias e indústrias fertilizadoras, apontando para mais de 420 gaseificadores em operação em 140 plantas ao redor do mundo, das quais 19 unidades nos Estados Unidos com algumas delas apresentadas na tabela 5.1.1 seguir. Observa-se entretanto que a maioria opera com carvão e não com biomassa.

Por outro lado, machin (2015) nota que o uso em biomassa ainda é bastante limitado, ratificado por minchener (2013), conforme pode ser visto nas figuras 5.1.1 e 5.1.2. O autor destaca que 25% das plantas de amônia e 35% das plantas de metanol do mundo utilizam a gaseificação.

A partir da tabela 5.1.1 verifica-se que a GE (General Electric) está presente em 5 das 12 maiores instalações de gaseificação do mundo, o que significa uma certa experiência no setor, trazendo mais valor ao dado já coletado de que se está desenvolvendo pesquisas com turbinas do tipo *heavy duty* quando se trata de biomassa como combustível. Uma segunda observação está no fato de que o carvão aparece em instalações que funcionam desde antes dos anos 80, o que atesta uma certa maturidade em termos de tecnologia de gaseificador para carvão. Para o caso do bagaço de cana, talvez algum pré-tratamento permita fazer com que suas características se aproximem das do carvão, como a torrefação sugerida e trabalhada no apêndice, a partir das referências utilizadas.

Tabela 5.1.1 Lista das 12 maiores plantas que utilizam gaseificação e estão em operação no mundo.

Local	Pais	Tecnologia	Gaseificador	MWth syngas	Início de operação (ano)	Matéria prima	Produto
Pearl GTL	Qatar	Shell	18 + 0	10936	2011	Natural gás	FT (Fischer Tropsch) liquids
Sasol Synfuels West	South Africa	Lourgy FBDB	40 + 0	7048	1977	Coal	FT (Fischer Tropsch) liquids
Sasol Synfuels East	South Africa	Lourgy FBDB	40 + 0	7048	1982	Coal	FT (Fischer Tropsch) liquids
Inner Mongolia Chemical Plant	China	Shell	3 + 0	3373	2011	Lignite	Methanol
Shenhua Ningxia Coal to Prolypropylene I	China	Siemens	5 + 0	1912	2011	Coal	Methanol
Great Plains Synfuels Plant	United States	Lurgi FBDB	12 + 2	1900	1984	Lignite	Syngas
Shenhua Baotou Coal-to-Olefins Plant	China	GE	5 + 2	1750	2011	Coal	Methanol
Hexigten SNG Plant	China	SEDIN	12 + 2	1670	2012	Coal	Syngas
SALUX IGCC Project	Italy	GE	3 + 0	1271	2000	Visbreaker residuo	Electricity
ISAB Energy IGCC Project	Italy	GE	2 + 0	1203	1999	FIOSE Asphalt	Electricity
Sanweo Neimenggu Methanol	China	GE	4 + 2	1167	2011	Coal	Methanol
Edwardspot IGCC	United States	GE	2 + 0	1150	2012	Coal	Electricity

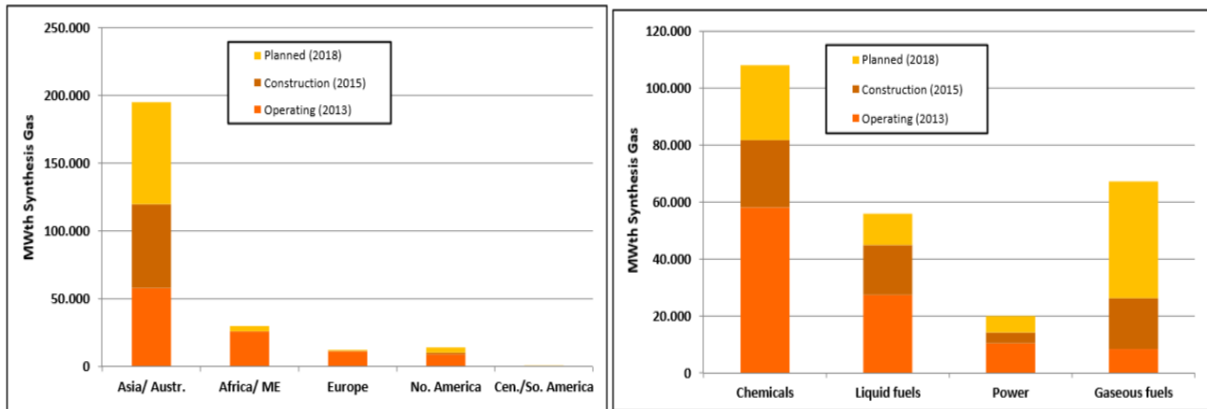
Fonte: Adaptado de Minchener (2013)

Minchener (2013) apresenta (figura 5.1.1) que a região da ásia e Austrália são as regiões com maior potência instalada, reportando que a gaseificação tem sido utilizada principalmente para fabricação de produtos químicos, combustíveis gasosos e líquidos, sendo a produção de energia elétrica o aspecto de menor uso.

Uma análise da figura 5.1.1 permite inferir que boas experiências poderão potencialmente ser obtidas em segmentos e aplicações que não necessariamente são de produção de energia elétrica.

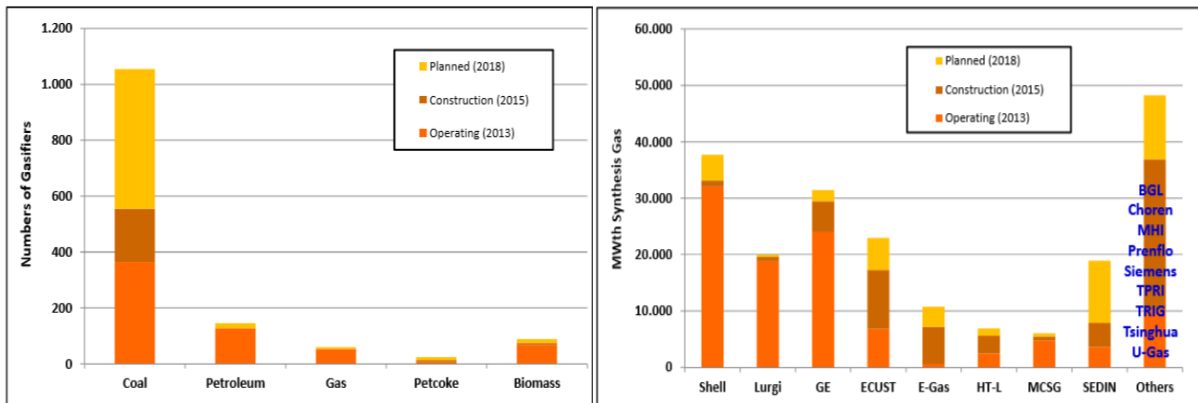
Minchener (2013) apresenta dados adicionais em relação as experiências globais de gaseificação, apresentados na figura 5.1.2. Observa-se que a maioria dos gaseificadores têm o carvão como combustível, mas que a biomassa possui também um número razoável de instalações, apesar de não serem fornecidos maiores detalhes como tipo de biomassa e localização. Com relação às plantas instaladas, ocupam a liderança as empresas GE e Shell.

Figura 5.1.1 Experiência internacional em gaseificação e produto básico



Fonte: Minchener (2013)

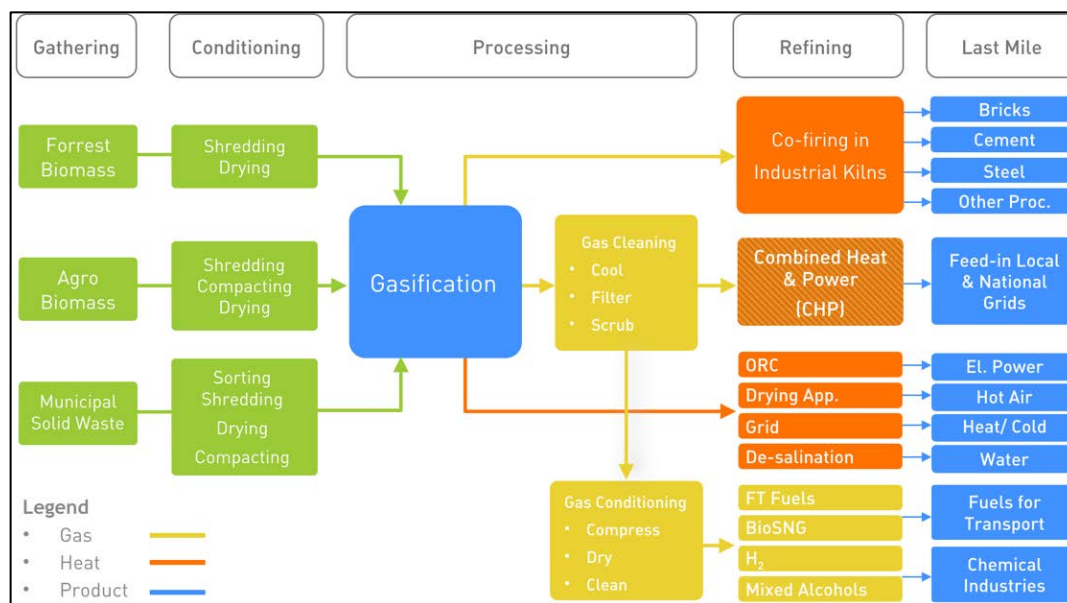
Figura 5.1.2 Experiência internacional: Matéria prima e tecnologias de gaseificação



Fonte: Minchener (2013)

Uma das plantas recentes com gaseificação de biomassa é a planta de Güssing, na Austria (Güssing, 2018), cujo fluxograma é ilustrado na figura 5.1.3. Esta planta possui 8MWth (MW térmicos) e 2MWel (MW elétricos), trabalha com cavacos de madeira em umidade entre 20 a 30%, e um FICFB (*Fast Internal Circulating Fluidized Bed*) gaseificador de leito fluidizado rápido. Neste gaseificador a zona de gaseificação é separada da zona de combustão utilizando dois reatores, vapor é utilizado como agente oxidante, e se obtém gás de síntese com poder calorífico médio de 12 MJ/Nm³. As vantagens observadas estão praticamente (a) na eliminação do conteúdo de nitrogênio, entretanto no caso de bagaço de cana de açúcar, este componente não é o de maior preocupação; (b) na possibilidade de se otimizar de maneira independente a combustão e a gaseificação, e (c) no fato de ser possível uma conversão praticamente completa, sem a produção portanto, de resíduos de carbono.

Figura 5.1.3 Aplicações do gás de biomassa



Fonte: Güssing (2018)

Outra observação é que o gás produzido passa por dois estágios de limpeza na saída do gaseificador, com filtros e um lavador de gases (*scrubber*), ambos precedidos de um trocador de calor que reduz a temperatura de 850-900°C para 160-180°C. No scrubber o gás tem sua temperatura reduzida a cerca 40°C para se adequar ao motor de combustão interna (ciclo otto). Um esquema resumido está apresentado na figura 5.1.4. Segundo a IEA bioenergy (task 33), esta planta está desativada, mas outras unidades com a mesma tecnologia estão em operação: desde janeiro de 2017 há uma planta de 4MWth, produzindo 1MWe e 1MWth em Nongbua, na Tailândia, e Daigo no Japão, produzindo 1.2MWe e 1,5 MWth a partir de 4MWth.

IEA (2016) analisa o panorama atual (base de dezembro 2015) dos sistemas de gaseificação de biomassa no mundo. Este relatório inclui apenas a experiência dos países membros: Áustria, Dinamarca, Finlândia, Alemanha, Itália, Suécia, Suíça, Holanda, Noruega e estados unidos. O levantamento apontou 53 plantas produzindo chip (*combined heat and power/cogeração*), a partir da biomassa. Havia 41 plantas em operação, 4 em construção, 7 inoperantes e 1 sem informações detalhadas. O total de plantas no relatório são 86 unidades, com 18 produzindo gás de síntese e 15 outros gases.

Independentemente do processo utilizado, IEA (2016) aponta ser sempre necessário o tratamento da biomassa antes da gaseificação, incluindo picadores, secadores e remoção de resíduos desnecessários. Após a gaseificação, há a necessidade de limpeza para adequação ao uso final, sendo um deles a remoção de particulados, como ilustrado na figura 5.1.6.

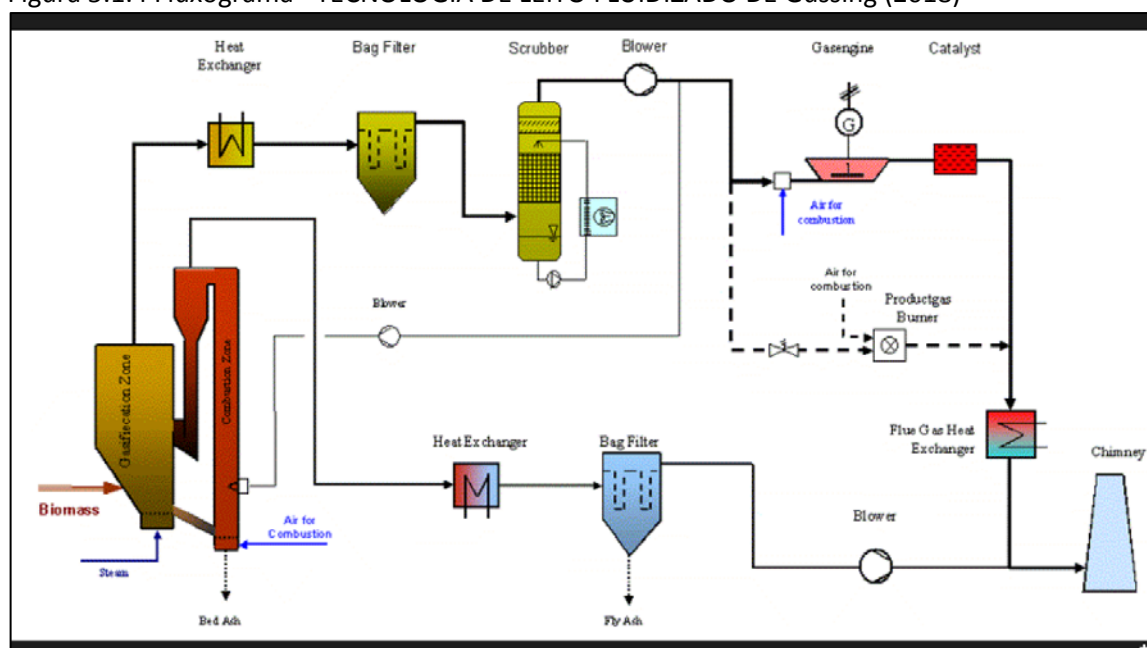
Estas conclusões são consideradas uma boa referência para o projeto de um gaseificador de bagaço de cana de açúcar, haja visto que a maioria das experiências bem sucedidas respeitaram esta configuração.

Há de se ponderar todavia a questão dos custos, uma vez que quanto mais complexo o sistema, menor será sua viabilidade econômica. Uma outra observação está no fato de que a maioria das instalações operando satisfatoriamente controlam a temperatura da reação dentro do gaseificador para que ocorra acima da temperatura de fusão das cinzas, a fim de que estas não se encrustem em seu interior; mesmo para o bagaço, que possui baixo teor de cinzas, entre 2 a 4% em média, esta parece ser uma colocação válida.

IEA (2018), através da task 33 discute a situação mais recente da gaseificação de biomassa no mundo. O mapa da figura 5.1.5 ilustra a concentração das plantas na Europa e nos estados unidos. Existem 178 projetos no mundo, dos quais 123 (69%) estão em operação, 9 (5%) em fase de construção, 6 (3,3%) estão planejados; 37 unidades (30%) se encontram inoperantes.

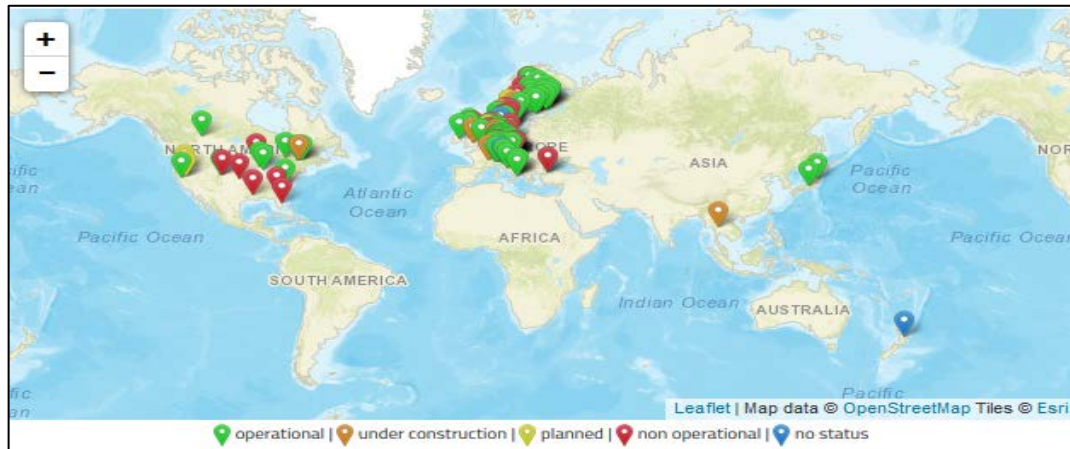
Uma análise detalhada de IEA (2018), incluindo as plantas em operação (listadas no apêndice, item 8.6) e as plantas que foram desativadas, permite observar que as plantas de leito fixo são maioria de baixas potências, normalmente abaixo de 200kw (como esperado). A única tecnologia de leito fluidizado em operação parece ser a de Güssing (2018), sendo que a maioria que saiu de operação empregava leito fluidizado. Este contexto faz pensar no gaseificador por fluxo de arraste como opção.

Figura 5.1.4 Fluxograma - TECNOLOGIA DE LEITO FLUIDIZADO DE Güssing (2018)



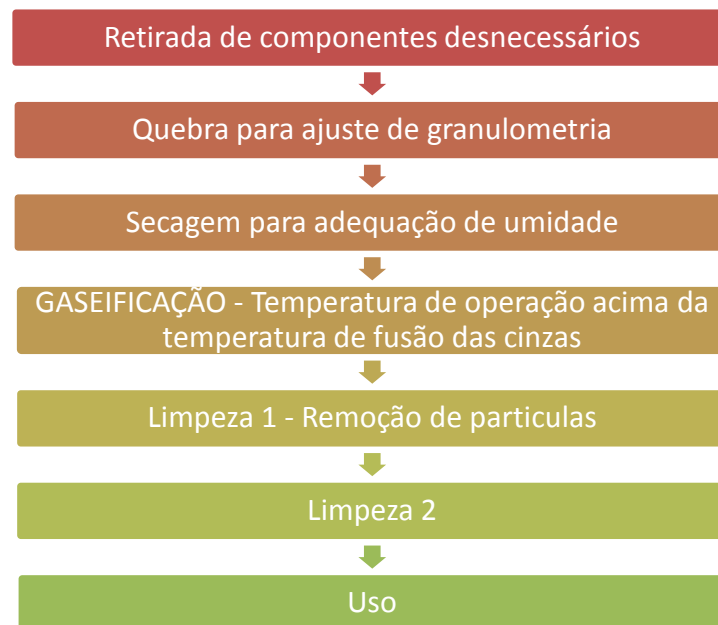
Fonte: Güssing (2018).

Figura 5.1.5 Distribuição geográfica das plantas de gaseificação de biomassa.



Fonte: IEA (2018)

Figura 5.1.6 Processo de preparação da biomassa



Fonte: Adaptado de IEA (2016).

IEA (2016) também detalha os processos envolvidos, conforme ilustrado na figura 5.1.7 (a), (b) e (c). Segundo o relatório, a utilização de turbinas a gás só apresenta resultados satisfatórios em caso de gaseificadores pressurizados; outra observação é que o *scrubber* parece apresentar resultados positivos somente em pequena escala (10 kWe) e com a utilização de gaseificador de leito fixo, o que não seria o contexto no setor sucroalcooleiro.

Figura 5.1.7 (a) – Limpeza por resfriamento e secagem do gás/ leito fixo/ pequena escala (>200kWe)



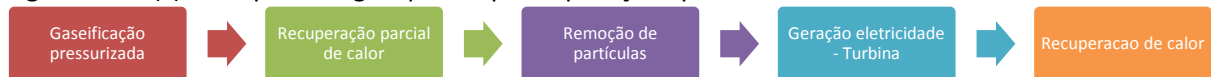
Fonte: Adaptado de IEA (2016)

Figura 5.1.7 (b) – Limpeza por remoção catalítica



Fonte: Adaptado de IEA (2016)

Figura 5.1.7 (c) – Limpeza do gás quente para aplicações pressurizadas



Fonte: Adaptado de IEA (2016).

A tabela 5.1.2 apresenta um resumo dos fatores mais comuns observados nas 41 plantas em operação, no que diz respeito as influências da pressão, temperatura e do agente gaseificante conforme IEA 2016. Uma conclusão do estudo é que o tipo de biomassa utilizada terá pouca influência na composição principal do gás, exceto em termos de impurezas.

Tabela 5.1.2 Resumo das características comuns as diversas aplicações

Temperatura	Pressão	Agente gaseificante
• Maior temperatura significa tempo mais rápido de obtenção do equilíbrio • Maior temperatura significa uma tendência do aumento da concentração de H₂ e redução CO • Concentração de CO₂ relativamente estável em relação a variação de temperatura	• A influência da pressão de trabalho na composição química do gás de síntese parece ser limitada • Exceto no caso de leito fluidizado, um aumento na pressão tende a aumentar a concentração de CO₂ e reduzir a de H₂ e CO	• Ar normalmente significa o aumento na presença de nitrogênio (não significativo para bagaço de cana de açúcar) • Ar também é sinônimo de menor poder calorífico • Maior a umidade, menor o poder calorífico

Fonte: Adaptado de IEA (2016)

Complementarmente, Energy (2018) comenta que as dificuldades enfrentadas na implementação de projetos de gaseificação de uma maneira geral estão principalmente no fato de que a tecnologia existente ainda é muito cara, e que somente a continuidade dos estudos e o desenvolvimento tecnológico, como o que ocorreu com as eólicas, poderá tornar os sistemas suficientemente competitivos nas diversas áreas de produção de combustíveis e energia. Entre os potenciais pontos de desenvolvimento da tecnologia está sugerido, por exemplo, focar na redução do preço das turbinas a gás dedicadas a gás de síntese, bem como nos processos de separação de oxigênio, pela influência destes custos no sistema.

Scott, Bain & kinoshita (2002) relatam a experiência do projeto paia, companhia de açúcar em Maui Havaí, o único projeto de que se tem referência e que efetivamente operou com bagaço de cana de açúcar. Neste projeto se empregou um gaseificador de leito fluidizado borbulhante pressurizado (até 34,5 bar) que iria produzir 22mwe. O projeto foi desativado pois, segundo os autores, não foi possível resolver as dificuldades de limpeza do gás de saída do gaseificador a 20 bar, pressão de trabalho da turbina.

Além deste projeto Scott, Bain & kinoshita (2002) descrevem brevemente também a experiência da planta de Varnamo na Suécia com capacidade de 6mwe e 9mwth, atualmente desativada. Nesta, se empregou um filtro de cerâmica na saída do gaseificador de leito fluidizado circulante pressurizado.

O terceiro projeto reportado é o de Greve-In-Chianti, Itália, com um gaseificador de leito fluidizado circulante, ainda operacional, utilizando biomassa peletizada e produzindo 30mwth, divididos em duas unidades de 15mwth. Observe-se que esta unidade tem a finalidade térmica e portanto não apresenta as mesmas necessidades de limpeza do gás de síntese como no caso da turbina a gás.

Por último, com as lições aprendidas em Maui, os autores apresentam a o diagrama apresentado no anexo 8.7 para o caso da planta Olokele/ G&R na ilha de Kauiai no Havaí com processamento de 2800 toneladas/dia de cana de açúcar, aproximadamente 400 toneladas de bagaço. Neste diagrama sugerido, os autores analisaram o processo de secagem da biomassa a ser alimentada, reduzindo a umidade do bagaço de 48% para 20%. Considerando um gaseificador de leito fluidizado pressurizado borbulhante, foi estudada a limpeza por ciclones e um condensador. A turbina é alimentada com gás de síntese a 13,6 bar (não mais 20 bar), a eficiência térmica do ciclo foi avaliada em 53%. Este último projeto está apresentado na referência mencionada mas não foram encontrados dados operacionais ou de implantação a respeito.

A lista com os projetos atuais em operação comercial segundo IEA (2018) está apresentada no apêndice 8 item 8.6.

A tabela 5.1.3 apresenta o resumo das lições aprendidas vistas neste trabalho, visando orientar estudos futuros.

Tabela 5.1.3 Resumo das lições aprendidas a partir das plantas de gaseificação em operação no mundo

Resumo das lições aprendidas nas plantas de gaseificação em operação
• A gaseificação da biomassa é ainda ser uma tecnologia ainda em desenvolvimento. • Não foi encontrado nenhum caso em operação comercial de gaseificação do bagaço de cana de açúcar. • 25% da amônia e 35% das plantas de metanol globalmente são produzidos via gaseificação, o que parece ser uma potencial fonte de aprendizado. • Gaseificadores de leito fixo são empregados praticamente em potências pequenas (até uns 200kw) • A maioria das plantas com gaseificador de leito fluidizado estão fora de operação e as únicas funcionando (tecnologia de Güssing) empregam um gaseificador por leito fluidizado especial. • Alguns autores sugerem a utilização de gaseificador por fluxo de arraste pelo longo histórico de experiência com a tecnologia empregando carvão como combustível. Entretanto o mesmo deve ser adaptado para biomassa • No caso dos gaseificadores pressurizados, há ainda a dificuldade de limpeza do gás de saída do gaseificador na pressão de trabalho da turbina a (20 bar). • Fabricantes(GE) estão direcionando as turbinas do tipo heavy duty para emprego com biomassa, embora as plantas em operação utilizem motor de combustão interna. • Por possuir experiência e maturidade com gaseificadores no setor petroquímico, a tecnologia Shell pode ser uma alternativa a ser estudada. • Experiência Güssing: pré e pós gaseificação com limpeza, gaseificador de leito duplo com controle independente dos processos de gaseificação e combustão. • Adequação da granulometria e grau de umidade são duas etapas presentes em todas as plantas operacionais vistas (detalhes na figura 5.1.7 a, b, & c.). • A limpeza após a gaseificação, para adequação seja ao motor de combustão interna ou a turbina, está presente em todas as plantas operacionais relacionadas (detalhes na figura 5.1.7 a, b, & c.). • Uma análise especial da temperatura de gaseificação e do ponto de fusão das cinzas é importante na decisão do gaseificador para evitar incrustações no interior do mesmo. • Alguns autores indicam que turbina a gás só se torna funcional em caso de gaseificadores pressurizados, mas maiores testes são necessários. • Temperatura, pressão e agentes gaseificantes influenciam na composição do gás de síntese produzido e seus detalhes de influência estão listados na tabela 5.1.2. • Scrubbers só apresentaram bons resultados em projetos de pequena escala (<200kwe) • A limpeza dos gases para alimentação na turbina a gás ainda requer maiores pesquisas e testes • O alto custo dos equipamentos é uma das barreiras no desenvolvimento da tecnologia.

Fonte: Elaboração Própria a partir das referências no texto.

A partir do exposto, percebe-se que a gaseificação de biomassa é ainda uma tecnologia em desenvolvimento, com vários desafios e dúvidas a serem respondidos, com a tecnologia a vapor já bastante consolidada, entretanto com muitas aplicações de baixa eficiência.

6.0 CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi a análise das opções tecnológicas para aumento de eficiência nos sistemas de cogeração nas usinas de cana no Brasil e, em particular em São Paulo.

O Brasil possui experiência e tradição na produção de cana de açúcar e de etanol, o que permitiu também o desenvolvimento de um histórico crescente de produção de energia elétrica excedente, via cogeração a vapor. A cogeração nas usinas do setor sucroalcooleiro tem a vantagem de fazer uso de um combustível renovável. Uma outra vantagem no setor está no fato que a maioria das centrais de cogeração já possuem condições de operar por todo o ano, com a utilização de turbinas de condensação, apesar de isto ainda não ocorrer.

A maioria das usinas no setor sucroalcooleiro no Brasil ainda utiliza sistemas de baixa eficiência e, em 2016, menos da metade apresentaram geração de excedentes. O restante utilizava a cogeração apenas para consumo próprio.

Neste contexto, há necessidade de se analisar as perspectivas de introdução de tecnologias mais eficientes no setor, visando aumentar a geração de excedentes, em vista das inúmeras vantagens para o sistema interligado e para o setor, como discutido neste trabalho.

Entretanto, o bagaço de cana de açúcar apresenta alta umidade e baixa densidade energética, não é homogêneo e tem baixa granulometria, decompondo-se no caso de estocagem por longos períodos. Conforme analisado neste trabalho, a geração de eletricidade com biomassa de cana de açúcar vem perdendo espaço na matriz energética para a fonte eólica, em virtude de vários aspectos estruturais e conjunturais.

Assim sendo, aqui se apresentou e discutiu as opções tecnológicas mais eficientes existentes no mercado. Existem diversas configurações de ciclos de cogeração a vapor em operação no setor sucroalcooleiro, como por exemplo turbinas de extração, de condensação, de extração com condensação, além das configurações com ciclos abertos e fechados.

Além disso, há várias opções para melhoria da eficiência nos ciclos de cogeração nas usinas, tais como:

- caldeiras com maiores níveis de temperatura e pressão,
- utilização de cana de terceira geração;
- caldeiras, turbinas, geradores e bombas mais eficientes;

- emprego de ciclos fechados com condensador, ciclos rankine com aquecedores,
- eletrificação das moendas,
- utilização de palhas e pontas.

O maior ou menor uso destas técnicas faz com que uma usina seja capaz de produzir até 6,0 vezes mais energia com a mesma quantidade de bagaço.

Foram também apresentadas as perspectivas de tecnologias em desenvolvimento no mundo, como a gaseificação de biomassa, sendo analisadas as dificuldades ainda existentes para sua introdução no setor sucro alcooleiro. As principais dificuldades ainda existentes se referem à aplicação desta tecnologia de gaseificação para o bagaço de cana, considerando suas especificidades. As experiências existentes no mundo, tanto para biomassa em geral como para o bagaço de cana, foram analisadas, permitindo a conclusão de que esta tecnologia ainda se encontra em estágio de desenvolvimento, principalmente no que se refere à questão de limpeza dos gases para os diferentes usos finais.

Em particular, tem-se as seguintes conclusões:

- a) A gaseificação mostra maior presença no setor petroquímico, sendo responsável pela produção estimada de 25% da amônia e 35% do metanol no mundo;
- b) O ciclo combinado a gás tem um potencial adicional de produção de energia nas usinas de açúcar e álcool aproximadamente entre 20% (quando adicionado a uma planta existente) e 40% quando de uma planta nova, vencidos os desafios tecnológicos da gaseificação do bagaço.
- c) As experiências com o processo de limpeza do gás de saída nas pressões de trabalho da turbina (20 bar) mesmo com filtros de cerâmica não apresentaram resultados satisfatórios.
- d) Além do tipo de gaseificador, é necessário preocupar-se com diversos aspectos, como pressão de operação, tipo de oxidante e sistema de limpeza adequado, entre outros. Alguns autores acreditam que a desativação ou abandono de um ou outro projeto pode ter ocorrido em função da má seleção do gaseificador.
- e) A gaseificação de biomassa ainda ocupa proporções pequenas em relação à utilização da gaseificação como um todo.

É importante observar que trabalho não tem intenção de ser conclusivo, e não busca avaliar os aspectos econômicos e ambientais, mas busca permitir a discussão para que o setor viabilize tecnologias mais eficientes e ambientalmente corretas, sendo também mais competitivo, no que tange à produção de energia para consumo próprio e comercialização.

7.0 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Com o presente estudo se verificaram as enormes possibilidades de aprofundamento do tema, em particular nos seguintes aspectos:

- a) Avaliação dos métodos de pré-tratamento da biomassa para adequação ao gaseificador;
- b) Estudo detalhado quanto a seleção do gaseificador adequado;
- c) Análise comparativa entre o emprego da turbina a gás ou do motor de combustão interna;
- d) Estudo detalhado dos tratamentos necessários dos tratamentos de limpeza e adequação do gás produzido no gaseificador para utilização na turbina ou no motor de combustão interna;
- e) Análise econômica e ambiental das configurações apresentadas, para averiguação da viabilidade ou não da gaseificação para produção de energia elétrica excedente nas usinas;
- f) Avaliação dos potenciais rendimentos que se obteriam mantendo-se os ciclos a vapor, mas com variações dos sistemas Rankine, por exemplo, adicionando um superaquecedor, ciclo com reaquecimento ou regenerativo;
- g) Avaliação da possibilidade de produzir-se algum químico sintético, como por exemplo amônia, a partir do processo de gaseificação nas usinas do setor sucroalcooleiro;
- h) Verificação do potencial de geração de energia elétrica com outras configurações de ciclo combinado;
- i) Estudo da possibilidade de combinar uma instalação já existente com a adição da gaseificação para o melhor aproveitamento da energia excedente;
- j) Estudo do processo de limpeza e ou adequação do gás de saída as condições da turbina a gás;
- k) Análise dos cenários tendo em vista proporções de palhas e pontas;
- l) Avaliação de cenários de cogeração com diferentes tipos e modelos de turbinas a gás;

8.0 APÊNDICE

8.1 Matriz Energética Brasileira

A tabela extraída da ANEEL 2018 apresenta a matriz energética nacional e seu respectivo potencial representativo, conforme a tabela 8.1.1.

8.1.1 Matriz energética nacional por combustível de origem

Fonte			Capacidade Instalada			Total			
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	(KW)	%	Nº de Usinas	(KW)	%	
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	405	11.271.611	6,7029	422	11.353.572	6,7517	
		Biogás-AGR	3	4.928	0,0029				
		Capim Elefante	2	31.700	0,0189				
		Casca de Arroz	12	45.333	0,0270				
	Biocombustíveis líquidos	Etanol	1	320	0,0002	3	4.670	0,0028	
		Óleos vegetais	2	4.350	0,0026				
		Carvão Vegetal	8	43.197	0,0257				
	Floresta	Gás de Alto Forno - Biomassa	12	127.705	0,0759	97	3.156.630	1,8772	
		Lenha	5	23.915	0,0142				
		Licor Negro	18	2.542.616	1,5120				
		Resíduos Florestais	54	419.197	0,2493				
		Biogás - RA	14	4.481	0,0027				
		Biogás - RU	20	133.129	0,0792				
Resíduos animais	Resíduos sólidos urbanos	Carvão - RU	1	2.700	0,0016	14	4.481	0,0027	
		Cinética do vento	536	13.135.243	7,8112				21
Eólica	Cinética do vento								
Fóssil	Carvão mineral	Calor de Processo - CM	2	28.400	0,0169	24	3.717.830	2,2109	
		Carvão Mineral	14	3.323.740	1,9765				
		Gás de Alto Forno - CM	8	365.690	0,2175				
		Calor de Processo - GN	1	40.000	0,0238				
	Gás natural	Gás Natural	165	12.959.978	7,7070	166	12.999.978	7,7307	
		Calor de Processo - OF	1	147.300	0,0876				
	Outros Fósseis	Petróleo	Gás de Alto Forno - PE	1	1.200	0,0007	2259	9.860.079	5,8635
			Gás de Refinaria	6	315.120	0,1874			
			Óleo Combustível	78	4.055.967	2,4120			
			Óleo Diesel	2156	4.459.464	2,6519			
			Outros Energéticos de Petróleo	18	1.028.328	0,6115			
	Hídrica	Potencial hidráulico	Potencial hidráulico	1333	102.177.211	60,7621	1333	102.177.211	60,7621
	Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	1,1834	2	1.990.000	1,1834
Solar	Radiação solar	Radiação solar	2246	1.306.535	0,7770	2246	1.306.535	0,7770	
Undi-Elétrica	Cinética da água	Cinética da água	1	50	0,0000	1	50	0,0000	
Importação		Paraguai		5.650.000	3,3599			4,8584	
		Argentina		2.250.000	1,3380				
		Venezuela		200.000	0,1189				
		Uruguai		70.000	0,0416				
		Total	7125	168.159.408	100				7125

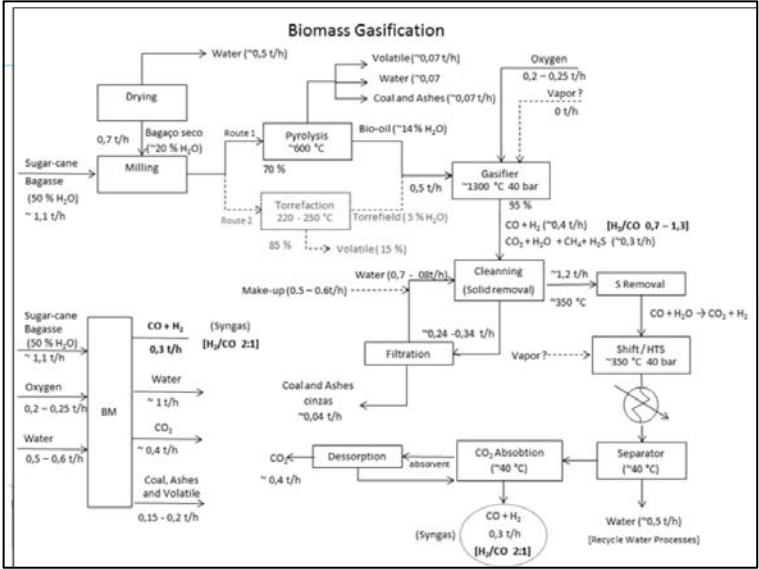
FONTE: ANEEL (2018)

8.2 Pré-Tratamento De Torrefação Para Gaseificação Por Fluxo De Arraste.

Como ficou claro em IEA (2016) e no capítulo de lições aprendidas, faz-se necessário tomar as medidas de pré-tratamento que permitam empregar o combustível (no caso o bagaço) adequadamente. Em uma revisão na literatura tanto Machin (2015) como Ett (2014) optam por processo de torrefação. Como um adendo o esquema do experimento de Ett (2014) esta apresentado na figura 8.2.1 a seguir, vale notar que o autor não necessariamente estava preocupado em produzir energia, e sim gás de síntese, e por isso também se explora a possibilidade do pré-tratamento de pirolise como ilustrado na figura. O importante aqui é notar que para ambos os processos o pré-tratamento por torrefação é o método escolhido. Este subitem se dedica a verificar algumas das razões para esta decisão.

Por exemplo, caso a opção fosse utilizar um gaseificador do tipo fluxo de arraste, a primeira exigência está em obter-se um combustível com teor de umidade entre 10 e 20%, o segundo aspecto a ser respeitado é a quase pulverizada granulometria, já que quanto menor maiores as condições de transferência de calor.

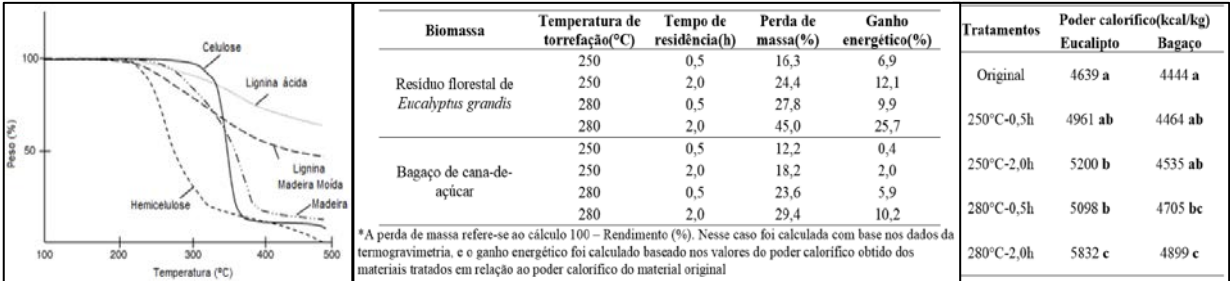
Figura 8.2.1 Processo de torrefação como pré-tratamento da gaseificação.



Fonte: Ett (2014)

Em seu trabalho Santos (2012) define torrefação como um tratamento térmico de acréscimo de calor que causa alterações químicas na estrutura da biomassa de forma que esta passa a possuir um estado intermediário entre *in natura* e o carvão vegetal. Com este tratamento, cujos fatores de maior influência no resultado final são temperatura e tempo de reação, que no caso do bagaço de cana de açúcar e eucalipto, ainda conforme a autora, ocorre entre 250 e 280 °C e entre 0.5 e 2.0 horas de duração, se obtém um material com as propriedades a seguir. Parte dos resultados obtidos por Santos (2012) são apresentados na figura 8.2.2. Basu (2010) atesta a compreensão de Santos (2012) e com seu gráfico à direita comenta que a redução em peso se dá pela alteração da estrutura na celulose, lignina e hemicelulose. Os benefícios da torrefação apontados por Santos (2012) podem ser apontados como:

Figura 8.2.2 Resultados dos experimentos de torrefação do bagaço de cana



Fonte: Adaptado de Santos (2012) & Basu (2010)

- (a) Maior poder calorífico pela redução da umidade e consequente maior concentração de carbono;
- (b) Maior capacidade de fragmentação ou friabilidade;

- (c) Menor granulometria,
- (d) Maior homogeneidade;
- (e) Perda de massa;

Para questionar um pouco os resultados de Santos (2012), Patel, Gami & Bhimani (2011) fizeram a experiência de torrefação a 300°C (573K) durante 1 hora e obtiveram (a) Aumento do teor de carbono em 4,34 vezes, (b) Aumento do teor de cinzas em 1,17 vezes, (c) Redução de umidade em 2,44 vezes, (d) Redução em peso de 3,63 vezes, (e) Redução do teor de voláteis em 1,31 vezes, (f) Uma densidade do bagaço mantida praticamente constante.

Uma outra experiência de torrefação vem de Basu (2010), realizando a torrefação a 250°C (523K) e diferentes tempos, obtendo os valores apresentados na tabela 11. Nesta a de se observar que o poder calorífico superior *in natura* inicial estava em 15,4 MJ/kg e atingiu 20,00 MJ/kg após a torrefação, outrossim a tabela também ilustra que este valor caiu para 17,75 MJ/kg líquidos descontada a energia utilizada no processo de torrefação, ao fazer $17,75/15,4 = 15\%$ de ganho energético, mais que os 10% obtido por Santos (2012) como ilustrado na tabela 8.2.1. Basu (2010) ainda afirma que mais que estes 15% são obtidos com uma torrefação a 300°C, por 1.5 horas.

Tabela 8.2.1 Torrefação do bagaço a 250°C (523K),

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 (% energia obtida / % massa obtida)	1,29	1,33	1,34
Energia requerida (MJ/kg bagaço torrefeito)	2,34	2,58	2,99
Poder Calorífico Superior (PCS) (MJ/kg bagaço torrefeito)	19,88	20,57	20,72
Aumento do PCS (%)	22,35	24,96	25,51
PCS (MJ/kg matéria-prima)	15,44	15,44	15,44
Energia líquida (MJ/kg bagaço torrefeito)	17,54	17,99	17,73

Fonte: Basu (2010)

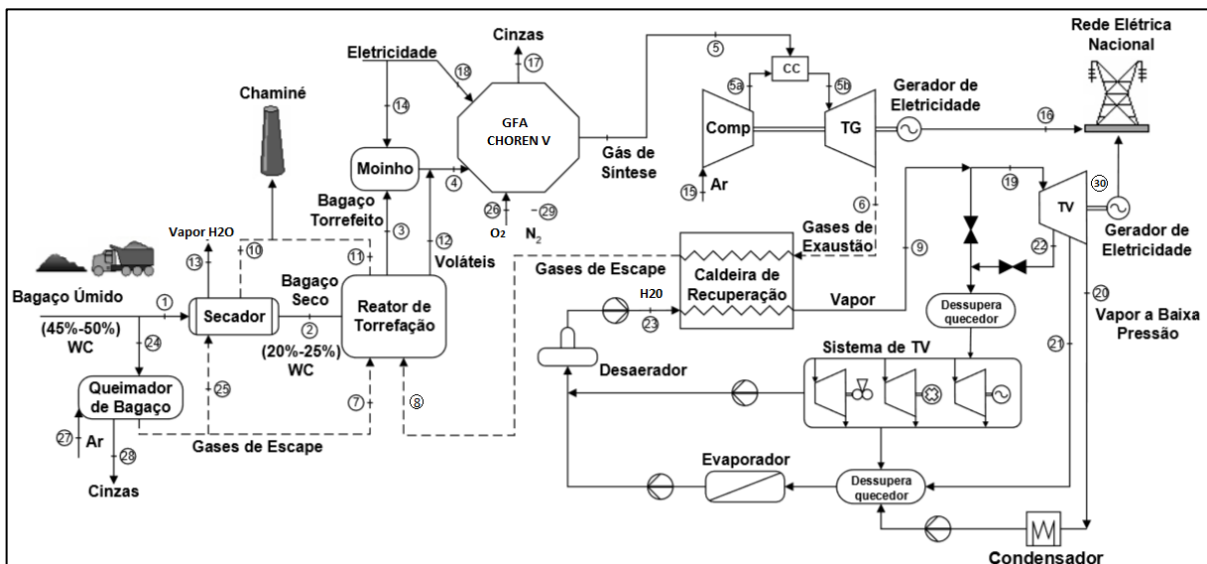
Este trecho teve como objetivo simplesmente apresentar os benefícios da torrefação, incluso o seu ganho de energia líquido como ilustrado na 8.2.1 acima.

8.3 Um Ciclo Combinado De Teste

Neste subitem se define um modelo de ciclo combinado e se discute ainda algumas de suas características operacionais.

A figura 8.3.1 apresenta o Integrated gasification combined cycle – Ciclo combinado. Utiliza-se gaseificador por fluxo de arraste tecnologia CHOREN (apesar da ciência – conforme IEA (2018) de que as plantas CHOREN não estão em operação, mas para fazer uma simulação com gaseificador por fluxo de arraste), sendo o oxidante oxigênio produzido a partir de uma unidade elétrica de separação, com um secador para redução de umidade, pré-tratamento por torrefação e um moinho que permite adequar a granulometria a requerida pelo gaseificador por fluxo de arraste. A energia para o reator de torrefação vem dos gases de escape da caldeira de recuperação, sendo complementada pela energia fornecida por um queimador complementar, o mesmo que fornece energia ao secador. É premissa que 100% do bagaço processado na usina é gaseificado, desta forma o vapor de processo é retirado no ciclo Rankine. Este esquema da figura 8.3.1 foi retirado de Machin (2015), com a diferença de que os parâmetros para cálculos são a usina padrão que vem sendo utilizada. Não aparece na figura, mas após o gaseificador esta considerada uma unidade de tratamento do gás para que este atenda aos requisitos de composição demandados pela turbina.

Figura 8.3.1 Gaseificação em ciclo-combinado com gaseificador por fluxo de arraste.



Fonte: Adaptado de Machin (2015)

Um aspecto importante a ser observado quando se trabalha com turbina a gás é o índice Wobbe, $Wobbe = PCS / \sqrt{SG}$, onde PCS se trata do poder calorífico superior e SG da densidade relativa do combustível. Sendo que quanto maior este índice, menor o fluxo mássico na seção transversal da turbina e portanto menos energia gerada pela mesma quantidade de gás circulante. Valores típicos para o gás natural segundo Kurz (2005) estão entre 48 e 53 MJ/Nm³ e no caso de gás de síntese a

8.4 Metodologia Para Análise Comparativa Da Eficiência

Para que a comparação quanto a eficiência seja a mais realística possível, esta é feita a partir de um ponto comum, ou seja, a mesma usina de cana de açúcar e parâmetros básicos utilizados na análise das soluções a vapor, cujos dados resumidos estão na tabela 8.4.1 seguir.

Tabela 8.4.1 Dados padrões para o cálculo da eficiência com o sistema gaseificado em ciclo-combinado.

Parâmetros básicos admitidos	
Processamento	300 tcm/ h
Massa de bagaço	265 kgb/ tcm
Palhas e pontas	Não consideradas
Gaseificação	100% do bagaço processado
Temperatura inicial bagaço	25°C
Poder calorífico <i>in natura</i> [50% umidade]	2280 kcal/ kgb
Consumo de vapor no processo	332 Kgv/ tcm
Pressão manométrica de vapor no processo	1,5 Kgf/ cm ²
Entalpia de vaporização da água h_{H_2O}	2260 KJ/kg
Entropia específica da caldeira de recuperação	1,23 KJ/Kg.K
Pré-tratamento	
Redução de umidade	Secagem
Eficiência do secador [%]	70
Poder calorífico seco [20% umidade]	3694 Kcal/ Kgb
Adequação ao gaseificador	Torrefação
Temperatura de torrefação	250°C
Duração da torrefação	0,5 horas
Percentual de voláteis após torrefação [%]	30
Percentual de bagaço torrefeito (CO+H ₂) [%]	70
Poder calorífico voláteis após torrefação	0,751 Kcal/ Kgb
Rendimento do torrefador	90%
Poder calorífico bagaço torrefeito	3,361 Kcal/ Kgb
Ao gaseificador	Bagaço + voláteis
Tipo do gaseificador	
Tipo	Por fluxo de arraste (GFA)
Tecnologia	Chorem Carbo-V®
Oxidante	Oxigênio
Produção de oxigênio	Unidade elétrica de separação oxigênio, nitrogênio
Turbinas	
A gás tipo	Heavy Duty
Rendimento da turbina a gás	37,8%
Eficiência da turbina a vapor η [%]	70
Rendimento do gerador η [%]	95
Eficiência da caldeira de recuperação [%]	70

Fonte: Elaboração Própria

8.5 Cálculo Da Potência Obtida No Ciclo Combinado Gaseificado

Tomada como base a figura 8.3.2 e os dados da tabela 8.4.1, são calculados os parâmetros ponto a ponto conforme a tabela 8.5.1 a seguir.

Tabela 8.5.1 Cálculos dos valores dos parâmetros termodinâmicos, ciclo-combinado gaseificado

	Fluxo mássico [kg/s]	Temperatura [K]	Temperatura [C]	Pressão [kPa]	Pressão [kgf/cm2]	Fluxo de energia [MW]	OBS
1	18,05	298	25	101,3	9934,14	132,15	Bagaço úmido
2	12,64	333	60	101,3	9934,14	132,15	Bagaço seco
3	8,84	373	100	101,3	9934,14	120,26	Bagaço torrefeito
4	12,64	373	100	101,3	9934,14	146,69	Baga+vola torrefei
5	14,94	323	50	1931	189366,41	117,35	Gás
6	124,31	860	587	107	10493,12	275,17	Exaustão TG
7	2,85	1278,93	1005,93	101,3	9934,14	3,21	Gás do queimador
8	124,31	544	271	101,3	9934,14	35,17	Escape caldeira
9	11,05	803	530	6468	634294,12	38,57	Vapor da caldeira
10	20,13	552,94	279,94	101,3	9934,14	5,90	Exaustão
11	127,16	474,04	201,04	101,3	9934,14	25,74	Exaustão
12	3,79		-273	101,3	9934,14		Voláteis torrefação
13	5,42	373	100	101,3	9934,14	14,49	Vapor H2O
14	xx	xx	xx	xx	xx	0,60	Alim. Elet. Moinho
15	109,38	298	25	101,3	9934,14	0,00	Ar ext.
16	Xx	xx	xx	xx	xx	43,92	Energia elétrica TG
17	0,76	298	25	101,3	9934,14	0,00	Cinzas gaseificador
18	Xx	xx	xx	xx	xx	4,43	Alim. Elet. Gaseific.
19	8,89	803	530	6468	634294,12	31,02	Vapor para a TV
20	1,53	316	43	8,5	833,57	3,93	Cond. Ciclo Rankine
21	4,72	420,3	147,3	245	24026,29	13,01	Alim. Desaque rank
22	2,65	699,3	426,3	2120	207900,98	6,99	Alim. Desaque proc
23	11,05	380,1	107,1	8820	864946,53	5,02	Alim. Caldeira
24	4,03	298	25	101,3	9934,14	29,51	Bagaço úmido
25	20,13	1278,93	1005,93	101,3	9934,14	20,40	
26	12,76	298	25	101,3	9934,14	0,00	
27	19,01	298	25	101,3	9934,14	0,00	Ar ext.
28	0,06	373	100	101,3	9934,14	10,66	Cinzas
29	10,08	298	25	101,3	9934,14	xx	
30	Xx	xx	xx	xx	xx	5,40	Energia elétrica GT
Ciclo						49,32	ELETRICA TOTAL
						300	tcm
						164,40	KWe/tcm
						23,4	η [%]

Fonte: Elaboração Própria

É possível notar que ao final chegou-se a 164,40 KWe/ tcm (quilowatts por tonelada de cana moída) e um rendimento médio no ciclo de 23,4%. Quando comparado com a situação número 9 da tabela 4.4.1, condição mais próxima, se obtém $164,40 / 118,27 = 39\%$ mais energia elétrica produzida para a mesma moagem por hora de cana de açúcar. Os resultados obtidos estão em linha com o observado por Ernesto (2009) e Coelho (1992).

8.6 Lista De Referência De Plantas Chip - IEA

Tomada a partir de IEA 2016, a lista da tabela 8.6.1 abaixo apresenta projetos exclusivamente de CHP (combined heat and power), foram marcados os que após o trabalho, são sugeridos como continuidade de estudo.

Tabela 8.6.1 lista de plantas CHP segundo IEA (2016).

N	Nome do Projeto	Início	Status	Combustível	Tecnologia	MWe	MWth
1	CHP Pratteln	2009	Não operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,130	0,260
2	Pelletsvergasser AEW Rheinfelden	2016	Planejado	Lignocelulose	Leito fluidizado, fluxo contra-corrente	0,165	0,260
3	CHP Agnion Biomasse Heizkraftwerk Pfaffenhofen	2001	Operacional	Lignocelulose	Leito fluidizado	6,10	32,5 (SNG)
4	Skive CHP Plant	2008	Operacional	Pellets de madeira	Leito fluidizado circulante	6,00	20,0
5	Autogasnord	xxx	Operacional	Lascas de madeira	Gaseificação pirolisada	0,40	0,60
6	Azienda agrícola Camardo	2012	Operacional	Lascas de madeira	Gaseificação pirolisada	0,30	Não informado
7	Urbas Calvello	2015	Operacional	Lascas de madeira	“Gaseificador especial”	0,20	0,34
8	Azienda agrícola San Vittore	xxxx	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,50	0,40
9	GAS 1000	xxxx	Não informado	Gás metano	Leito fixo descendente	1,00	2,00
10	CHP B&W Haarboore	1996	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo ascendente	1,00	2,90
11	FICFB Villach	xxxx	Não operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)		
12	CHP Urbas Eberndorf	2015	Operacional	Lascas das madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,430	0,85
13	Urbas Mallnitz	2013	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,250	0,54
14	Ciamber	xxxx	Operacional	xxxx	Leito fixo descendente	1,00	0,80
15	Comune Quingentole	2006	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,70	0,14

16	Duchi Fratelli	2010	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,96	3,20
17	CHP Duberndorf	xxxx	Não operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,70	xxxx
18	Urbas Terni	2015	Operacional	Lignocelulose	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,20	0,34
19	FICFB Oberwart	2008	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	2,80	4,10
20	CHP Urbas Neumarkt	2008	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,24	0,58
21	CHP Urbas Sulzbach-Laufen	2009	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,13	0,28
22	CHP BioSynergi pilot plant	2003	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante	0,09	0,20
23	Guascor Italia	2003	Operacional	Lascas de madeira	xxxx	4,2	Não informado
24	FICFB Güssing	2002	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	2,00	4,50
25	CHP Pfalzfeld	xxxx	Em construção	Lignocelulose	Leito fixo descendente	1,00	Xxx
26	Holzgasanlage 1 Kaeser Gasel	2015	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,14	0,24
27	Holzgasanlage 2 Kaeser Gasel	2016	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,14	0,24
28	BioSynergi CHP Demonstration plant	2015	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,30	0,75
29	CHP Pyroforce Nidwalden	2007	Operacional	Lascas de madeira	Gaseificador pirolisado	1,38	1,20
30	CHP Urbas Neukirchen	2011	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,35	0,60
31	CFB TZum	2006	Não Operacional	Restos animais	Leito fluidizado circulante	xxxx	3,00
32	CHP Heatpipe Reformer Neufarn bei Freising	xxxx	Operacional	Lignocelulose	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,11	0,25
33	Holzverstromungsanlage Bucher Escholz matt	2015	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,13	0,26
34	Kymijaervi II	2012	Operacional	Lixo inflamável (plástico, madeira)	Leito fluidizado circulante	50	90
35	Lamprecht	2015	Operacional	Lascas de madeira	Gaseificador urbano	0,20	320
36	Orzinouvi	2009	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,30	xxxx
37	Mekrijarvi Research Station	2005	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,03	0,08
38	MEVA VIPP Pilot	2006	Operacional	Lignocelulose	Por fluxo de arraste	0,50	1,00
39	Micro-scale biomass	2012	Operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,04	0,1

	gasification CHP Votler						
40	Wood Gasifier	xxxx	Operacional	Lascas de madeira	xxxx	xxxx	0,64
41	Pyroener Demonstration Plant	xxxx	Não operacional	Palha de trigo	Leito fluidizado	xxxx	6,00
42	Urbas Balingen	2013	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,25	0,55
43	CHP Arnsberg-Wildhausen	2016	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,27	0,41
44	CHP Urbas Konstanz	2011	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,14	0,30
45	CHP Stadtwerke Rosenheim	2015	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado	0,05	0,095
46	CHP Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm	2011	Operacional	Lignocelulose	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	4,60	15,00
47	Steiner A. & Cie AG	2013	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,05	0,11
48	CHP Flensburg	2009	Operacional	Lignocelulose	Leito fixo ascendente	0,07	0,28
49	CHP Demonstrationsanlagen URBAS	2001	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,15	0,30
50	Kempele Ecovillage	2009	Operacional	Lascas de madeira	Leito fluidizado circulante duplo (FICFB)	0,30	0,80
51	Vaxjo Varnamo Biomass Gasification Center AB	1995	Não operacional	Lignocelulose	Leito fluidizado circulante	6,00	8,00
52	CHP Grossenhain	xxxx	Operacional	Lignocelulose	Leito fluidizado circulante	6,00	21,00
53	Hillerod two stage gasifier	xxxx	Não operacional	Lascas de madeira	Leito fixo descendente	0,50	1,00
54	CHP Wila	xxxx	Não operacional	Lignocelulose	Leito fixo descendente	0,38	0,42

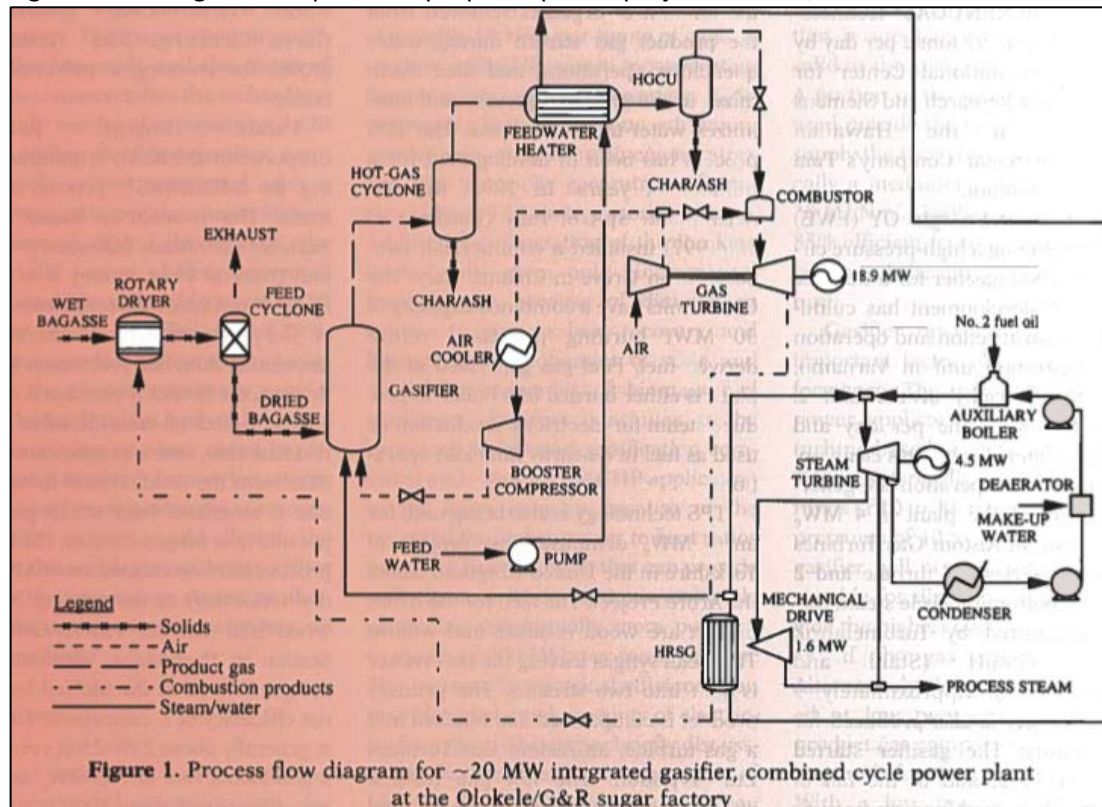
Fonte: Adaptado de IEA (2016)

8.7 Experiência Olokele/G&R Havaí

A partir de Scott, Bain & Kinoshita (2002) se obtém o estudo analítico da planta de açúcar de Olokele/G&R no Havaí. A observação do diagrama 8.7.1 apresentado é importante pois os autores estiveram por mais de 10 anos envolvidos em um projeto que até aonde se pode observar, se trata da única experiência real de gaseificação de bagaço de cana de açúcar, o projeto Paia, em Maui, também no Havaí, ou seja, os autores utilizaram-se das lições aprendidas para construir o presente diagrama e as condições de operação presentes nas tabelas 8.7.1 e 8.7.2 a seguir. A capacidade de processamento da planta é de 2800 toneladas de cana por dia, com aproximadamente 400 toneladas de bagaço. No processo se emprega uma fase de secagem e limpeza antes o gaseificador, um gaseificador de leito fluidizado borbulhante pressurizado, e na saída deste, outros dois processos de

limpeza, um por um ciclone e outro por um condensador, o ciclo é combinado e as potências extraídas e dados operacionais estão ilustrados a seguir. Um observação é o trabalho a 13 bar na turbina, e não mais a 20 como no exemplo de Maui.

Figura 8.7.1 Diagrama de processo proposto para o projeto Olokele/G&R Havaí.



Fonte: Scott, Bain & Kinoshita 2002.

Tabela 8.7.1 Condições de operação projeto Olekele/G&R

Pressure, bar	23.4
Temperature, °C	854
Bagasse feed rate to gasifier @ 20% m.c., kg h ⁻¹ (wet)	21,262
Steam, kg/kg feed (wet)	0.15
Air, kg/kg feed (wet)	1.23
Product gas composition, vol%	
H ₂	7.3
O ₂	0.05
N ₂	37.2
CO	10.6
CH ₄	7.0
CO ₂	14.6
H ₂ O	23.0
C ₂ H ₄	0.11
C ₂ H ₆	0.08
C ₆ H ₆	0.14
Gas yield, m ³ kg ⁻¹ feed (wet)	2.1
Gas heating value, MJ m ⁻³	5.1

Fonte: Scott, Bain & Kinoshita 2002.

Tabela 8.7.2 Dados de performance esperados projeto Olekele/G&R

Gasifier Inputs	
Bagasse to gasifier (20% m.c.), kg h ⁻¹	21,262
Air flow rate, kg h ⁻¹	26,153
Steam flow rate, kg h ⁻¹	3,189
Fuel Gas (post attemperation)	
Fuel gas flow rate, kg h ⁻¹	47,227
Temperature, °C	530
HHV, MJ m ⁻³	5.1
Gas and Steam Turbine Data	
Gas turbine inlet pressure, bar	13.6
Gas turbine pressure ratio	13.1
Mass flow through gas turbine, kg s ⁻¹	87
Gas turbine inlet temperature, °C	946
Gas turbine outlet temperature, °C	468
Gas turbine-generator unit efficiency, %	85
HRS-g-generated steam, kg h ⁻¹	42,799
Auxiliary boiler steam, kg h ⁻¹	10,286
Process steam to factory, kg h ⁻¹	49,895
Steam turbine inlet pressure, bar	41.4
Steam turbine inlet temperature, °C	316
Steam turbine exit pressure, bar	2.1
Steam turbine-generator unit efficiency, %	80
Plant Performance Summary	
Bagasse energy input, GJ h ⁻¹ (HHV basis)	321
Auxiliary energy input, GJ h ⁻¹ (HHV basis)	36.1
Net gas turbine power output, MW _e	18.858
Net steam turbine power output, MW _e	4.295
Booster compressor power, MW	0.475
Plant parasitic load, MW _e	0.902
Net plant power, MW _e	21.776
Plant efficiency, %	22.0*
Plant heat rate, kJ kWh ⁻¹	16,396

*Energy in steam exported to sugar factory not included.

Fonte: Scott, Bain & Kinoshita 2002

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, Dados de geração, www.aneel.gov.br/dados/geração, visitado em 23.07.2018 as 21:29

AZEREDO, V. M. C. "Setor Sucro-alcooleiro Brasileiro: Evolução e perspectivas." BNDES. 2007.

BASU, P. "Biomass gasification and pyrolysis, practical design." Academic Press, 2010. 460 p.

BRAM, V. D, 2015 "Challenges in biomass gasification". Ragatec, Barcelona, https://www.researchgate.net/publication/279850124_Challenges_in_Biomass_Gasification, visitado em 11 de Julho de 2018 as 21:35

BRIDGWATER, A. V. "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, Biomass and Bioenergy." v, 38, 2012, pp. 68-94.

BUDNY, D & **SOTERO**, P, editor (April 2007). "Brazil Institute Special Report: The Global Dynamics of Biofuels, 2007.

CASTRO, A J A; **CASSIANO**, A, A; **FERREIRA**, N, L "Gaseificação do bagaço de cana de açúcar: Modelagem, análise e comparação com o sistema real", 2009

COELHO, S.T. "Avaliação da cogeração de eletricidade a partir de bagaço-de-cana em sistemas de gaseificador/turbina a gás". Dissertação de mestrado. Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, PIPGE/ USP, 1992

COELHO, S.T. "Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo". Tese de doutorado. Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, PIPGE/ USP, 1999

COELHO, T – Informações pessoais. Empresa General Electric, GE do Brasil. 2018

CHICOA, A. E. S. "Eletrificação de sistemas de extração e preparo em usinas de açúcar e etanol: Análise de aplicação e eficiência energética na substituição de acionamentos mecânicos." 2017, PECE

CHIERICATO, T. "Sistemas de cogeração." Monografia apresentada ao Departamento de tecnologia agroindustrial de gestão de produção do setor sucroalcooleiro, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

CSIS, "Center for strategic & international studies." USA, <https://www.csis.org/programs/energy-and-national-security-program/projects/electricity-transition>, visitado em 13.06.2018.

ENERGY, 2018 – "The Energy technology laboratory." Departamento de energia dos Estados Unidos da América, <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/challenges>, visitado em 11 de Julho de 2018, as 19:30

EPE, “Anuário estatístico de energia elétrica 2017.” EPE, <file:///C:/4%20Brush/Private/Pece/TCC/Anuario2017%20EPEvf.pdf> (consultado em 14/06/2018 as 14:40)

ERNESTO, V.A.R.T. “Caracterização térmica do bagaço de cana de açúcar visando aproveitamento energético,” 115p. Dissertação (Mestrado em Química_ - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. Araraquara, 2009;

ETT, G – “Gaseificação de biomassa por fluxo de arraste.” Sexta conferência de novas tecnologias em biomassa, São Paulo, 2014

ETT, G & **LANDGRAF**, F – “Gasification of biomass.” Simpósio nacional de biocombustíveis de aviação, 2012

FILIPPIS, P.; **BORGIANNI**, C.; **PAOLUCCI**, M.; **POCHETTI**, F. “Gasification process of Cuban bagasse in two-stage reactor.” Biomass & Bioenergy, v. 27, 2008, pp. 247-252.

GOLDEMBERG, J, **LUCON**, O - “Energia renovável: Um futuro sustentável”, Revista USP, São Paulo, página 6-15, 2006-2007

GSTC, “Redefining clean Energy.” <https://www.globalsyngas.org/> GSTC Gasification technology council, (consultado em 30/06/2018 as 19:04).

GÜSSING, “Applications of the product gas”, by Holbauer, Technical University of Vienna, site: <http://gussingcleanenergy.com/technology/>, consultado em 30, Julho, 2018 16:16.

KURZ, R. “Gas Turbine Performance.” Proceedings of the thirty-fourth turbomachinery Symposium, College Station, TEXAS, USA, 2005

IEA BIOENERGY, “Status Report on thermal biomass gasification in countries participating in IEA Bioenergy task 33.” By Hrbek, J, Vienna University of Technology, Áustria, 2016

IEA BIOENERGY. “Gasification of Biomass and Waste.” Task 33, www.task33.ieabioenergy.com. Acessado em 2018

INNOCENTE, A. F. “Cogeração a partir da biomassa residual de cana de açúcar - Estudo de caso.” 2011 f. 111. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Ciências Agronômicas. UNESP - Campus de Botucatu, 2011.

IRENA, “Adapting market design to high shares of variable renewable energy.” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017

KUNTAL, J. & **SUDIPTA**, D. “Biomass integrated gasification combined cogeneration with or without CO₂ capture – A comparative thermodynamic study”, Renewable Energy, v. 72, 2014, 166, pp. 243-252.

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.

MATAI, P. H. L. S. Notas de aula. Disciplina “Aspectos ambientais e instalações em projetos de energia”. PECE, 2018.

MINCHENER, Andrew J. “Coal gasification for advanced power generation”. Fuel, v. 84, n. 17, p. 2222-2235, 2013.

MIRANDA, L.H.T.G. “Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso no município de Itanhaém (SP).” Monografia apresentada no Programa de Educação Continuada PECE da Escola Politécnica da USP, 2014.

MME – Ministério de minas e energia, [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica++ano+ref++2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica++ano+ref++2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2), 2016 (consultado em 14/06/2018 as 14:00)

MULDER, M. “Energy transition and the electricity market: an exploration of an electrifying relationship”, University of Groningen, March 2017, Groningen

NASCIMENTO, M.A.R., **LORA**, E.E, “Geração Termelétrica - planejamento, projeto e operação”, Ed. Interciência, Vols. 1 e 2, Rio de Janeiro, 2004.

PATEL, B.; **GAMI**, B.; **BHIMANI**, H. “Improved fuel characteristics of cotton stalk, prosopis and sugarcane bagasse through torrefaction.” Energy for Sustainable Development, v.15, 2011, pp. 372-37

REN 21, Renewables 2013 – Global status report. Paris, 2016

ROMÃO JUNIOR, R.A. “Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira.” Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho – UNESP, unidade Ilha Solteira, 2009

ROTHER L. “With Big Boost from Sugar Cane, Brazil Is Satisfying Its Fuel Needs”. The New York Times. Retrieved, 2008

SANTOS, F. A. “Análise da Aplicação da Biomassa da Cana como Fonte de Energia Elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade”, 2012. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

SANTOS, J.R.S. “Estudo da biomassa torrificada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana de açúcar para fins energéticos”. Dissertação de mestrado em ciências – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, Piracicaba, 2012.

SEA, Swedish Energy Agency. "The Chrisgas Project and the Varnamo Biomass Gasification Plant". 2009

SCOTT, Q.T, **Bain**, R.L & **KINOSHITA**, C.M. "Biomass gasification for combined heat and power in the cane sugar Industry", Int. Sugar jornal, 2002, vol. 104

SIMÕES MOREIRA, J. R. "Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética", Grupo GEN - LTC, 2017.

SOARES, D.H. "Gaseificação de biomassa de médio e grande porte para a geração de eletricidade: Uma análise da situação atual no mundo." Monografia apresentada no Programa de Educação Continuada (PECE) da Escola Politécnica da USP, 2012.

UNICA - Boletim: A Bioeletricidade da Cana em Números – Abril de 2018. Disponível em www.unica.com.br (acesso em 14/06/2018 as 11:02).

VAN DER MEIJDEN, C. M., **VERINGA**, H. J., **RABOU**, L. P. L. "The production of synthetic natural gas (SNG): A comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency." Biomass and Bioenergy v. 34, n. 3, 2010, pp. 302-31.