



UNIVERSIDADE DE UBERABA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL**

MARCELO COSTA DIAS

**DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR AO
QUEIMAR BAGAÇO DE QUATRO DIFERENTES CULTIVARES DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

UBERABA-MG

2019



MARCELO COSTA DIAS

DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR AO QUEIMAR BAGAÇO DE QUATRO DIFERENTES CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva

Coorientador:

Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini

UBERABA –MG

2019

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

D543d Dias, Marcelo Costa.
 Determinação da eficiência de uma caldeira aquatubular ao queimar
 bagaço de quatro diferentes cultivares de cana-de-açúcar / Marcelo Costa
 Dias. – Uberaba, 2019.
 48 f. : il. color.

 Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de
 Mestrado em Engenharia Química, concentração: Desenvolvimento de
 Processos Químicos Agroindustriais.
 Orientador: Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva.
 Coorientador: Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini.

 1. Energia elétrica e calor – Cogeração. 2. Cana-de-açúcar. 3.
 Caldeiras. I. Silva, Antônio Manoel Batista da. II. Begnini, Mauro Luiz.
 III. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia
 Química. IV. Título.

CDD 333.7932

MARCELO COSTA DIAS

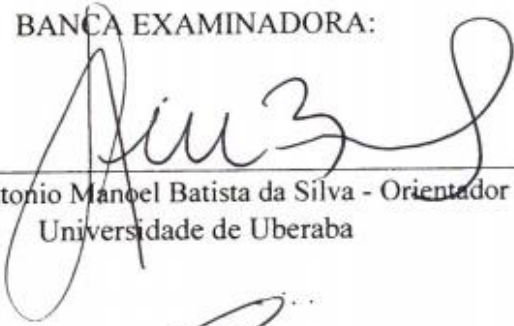
DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR AO QUEIMAR BAGAÇO DE QUATRO DIFERENTES CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR


Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).


Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 29/10/19

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Antonio Manoel Batista da Silva - Orientador
Universidade de Uberaba


Prof. Dr. Antonio Carlos Marangoni
Universidade do Estado de Minas Gerais


Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira
Universidade de Uberaba

DEDICATÓRIAS

Dedico este trabalho, aos meus pais, que me deram a oportunidade do saber e da aprendizagem, minhas irmãs e meus irmãos que me apoiaram e incentivaram em minha caminhada, pela sua compreensão toda minha família pelos momentos de ausência e por sempre esperarem o melhor de mim.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada sou e pelo seu amor, que em meus momentos difíceis iluminou meus caminhos e me fez prosseguir com meus objetivos.

Agradeço também a quem de alguma forma contribuiu para a realização deste estudo, em especial:

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva e Coorientador Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini pelos seus ensinamentos, exemplo acadêmico e pela oportunidade e auxílio no desenvolvimento do estudo, com orientações e conselhos, apontando sempre o melhor caminho a seguir.

Aos meus pais, Ronaldo Dias (em memória), Maria Vanda Costa Dias, pelo amor, carinho, educação, ensino, exemplo, pelo exemplo de vida que me deram e pelo constante apoio.

Agradeço as minhas irmãs, Eliana Costa, Claudia Maria Costa e meus irmãos Antônio Ronaldo e Carlos Alberto, e todos os meus sobrinhos pois de alguma maneira sempre me incentivavam a nunca desistir e acima de tudo acreditaram em meu potencial.

Aos meus colegas de trabalho em especial Adriano Dawison por autorizar a utilização dos dados base de sua tese de doutorado e por estar sempre disponível em alguma orientação suplementar

A todos os familiares em especial meu primo Carlos César e amigos que esperam sempre pelo meu sucesso.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG, à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, à UNIUBE - Universidade de Uberaba pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.

“Se tens que lidar com água consulta primeiro a experiência depois a razão”

Leonardo Da Vinci

RESUMO

A oferta de energia elétrica é muito importante para o desenvolvimento industrial de um país permitindo a expansão da atividade industrial e ao mesmo tempo outros setores da economia absorvem o resultado dessa atividade contribuindo também para o desenvolvimento econômico do país. Com grande destaque entre as fontes de energia renováveis a biomassa oriunda do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um grande potencial na produção de energia elétrica e tem uma vasta área de cultivo no Brasil. Além da área cultivada outro fator favorável na produtividade do setor sucroalcooleiro que resulta em ganho na produção de energia elétrica é a diversidade de cultivares plantadas, o melhoramento das espécies e as características da região onde ela é cultivada. Dados divulgados pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA) mostram que do total processado 92,3% foi feito pela região Centro-Sul compreendida pelos Estados da região Sul, Sudeste e Centro-Oeste, já os 7,7% restante foi feito pelos Estados da região Norte-Nordeste. Através da demanda por energia oriunda de fontes renováveis o objetivo desse trabalho é determinar a eficiência térmica de uma caldeira aquatubular pela queima do bagaço de quatro cultivares de cana-de-açúcar SP 80-1816, RB72-454, SP80-3280 e SP81-3250. Essas cultivares são plantadas na região centro-sul onde se localiza os maiores produtores de cana-de-açúcar do país. Os resultados mostraram a importância da análise da disponibilidade energética da cultivar que está sendo utilizada na cogeração de energia, o ótimo rendimento ou a melhoria da produção de energia no que diz respeito a produção de vapor é dependente das variáveis intrínsecas de cada cultivar como por exemplo: teor de bagaço, umidade e disponibilidade energética. Essa análise é muito importante para que se obtenha a melhoria nos processos de produção de energia oriunda de fontes renováveis.

Palavras – chave: Cogeração, energia, cana-de-açúcar, eficiência energética, caldeira.

ABSTRACT

The supply of electricity is very important for the industrial development of a country allowing the expansion of industrial activity and at the same time, other sectors of the economy absorb the result of this activity also contributing to the economic development of the country. Highlighting among the renewable energy sources, sugarcane bagasse biomass has a great potential in the production of electric energy and has a large cultivated area in Brazil. In addition to the cultivated area, another favorable factor in the productivity of the sugar and alcohol sector that results in gain in the production of electric energy is the diversity of cultivated cultivars, the improvement of species and the characteristics of the region where it is cultivated. Data released by the Sugarcane Industry Union (UNICA) show that of the total processed 92.3% was made by the Center-South region comprised by the states of the South, Southeast and Midwest, while the 7.7%. The rest was made by the states of the North-Northeast region. Through the demand for energy from renewable sources, the objective of this work is to determine the thermal efficiency of an aquatubular boiler by burning the bagasse of four sugarcane cultivars SP 80-1816, RB72-454, SP80-3280 and SP81-3250. These cultivars are planted in the center-south region where the largest sugarcane producers in the country are located. The results showed the importance of the analysis of the energy availability of the cultivar being used in energy cogeneration, the optimal yield or the improvement of the energy production with respect to steam production is dependent on the intrinsic variables of each cultivar as for example: bagasse content, humidity and energy availability. This analysis is very important to improve the processes of energy production from renewable sources.

Keywords: Cogeneration, energy, sugar cane, energy efficiency, boiler.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Porcentagem de energia renovável e não renovável utilizada no Brasil e no Mundo | 1 |
| 2 | Porcentagem de energia renovável utilizada no Brasil | 2 |
| 3 | Porcentagem de energia não renovável utilizada no Brasil | 2 |
| 4 | Áreas de cultivo da cana-de-açúcar | 6 |
| 5 | Colheita de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo período 1990-2015 | 7 |
| 6 | Níveis de CO ₂ emitidos após a implantação da cogeração de energia | 8 |
| 7 | Aspectos morfológicos da cana-de-açúcar | 9 |
| 8 | Principais produtos originários da cana-de-açúcar | 10 |
| 9 | Distribuição energética da cana-de-açúcar | 11 |
| 10 | Geração de energia elétrica através da biomassa | 11 |
| 11 | Geração de energia elétrica através da biomassa | 12 |
| 12 | Constituição do bagaço da cana | 16 |
| 13 | Esquema básico de um gerador de vapor e suas funcionalidades | 19 |
| 14 | Esquema básico de um gerador de vapor flamotubular | 20 |
| 15 | Caldeira de tubos verticais | 22 |
| 16 | Caldeira de tubos horizontais | 22 |
| 17 | Caldeira Cornuália | 23 |
| 18 | Caldeira Lancaster | 23 |
| 19 | Caldeira aquatubular | 24 |
| 20 | Circulação de água natural | 24 |
| 21 | Circulação de água forçada | 25 |
| 22 | Corte transversal de Caldeira aquatubular | 26 |
| 23 | Diagrama de água e vapor na caldeira em estudo | 29 |
| 24 | Volume de controle de uma caldeira a vapor | 33 |
| 25 | Diagrama de massa e energia de uma caldeira a vapor | 33 |
| 26 | Balanco de cinzas na caldeira | 35 |
| 27 | Nomograma de perdas de calor para o meio ambiente | 37 |
| 28 | Carta de perda de energia por radiação padrão ABMA (ASME PTC 4.1, 1964). | 38 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Produção e moagem de cana, safra 2018/2019 | 3 |
| 2 | Participação no consumo final de energia, ano base 2018 | 9 |
| 3 | Composição química do bagaço seco em % | 15 |
| 4 | Poder calorífico superior a biomassa (base seca). | 17 |
| 5 | Poder calorífico das cultivares de cana pesquisadas | 17 |
| 6 | Resultados do consumo de bagaço da cana-de-açúcar | 40 |
| 7 | Resultados da energia fornecida e útil através da queima do bagaço da cana-de-açúcar | 40 |
| 8 | Resultados da eficiência da caldeira utilizada para estudo | 41 |
| 9 | Valores de referência para o cálculo da energia fornecida | 41 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Geração de energia elétrica por diversos setores | 13 |
| 2 | Classificação dos biocombustíveis | 14 |
| 3 | Classificação das caldeiras de acordo com a aplicabilidade | 20 |
| 4 | Vantagens e desvantagens da caldeira flamotubular | 21 |

SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| Mtep | Megatonelada equivalente de petróleo |
| TWh | Terawatt-hora |
| OIE | Oferta Interna de Energia |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| ÚNICA | União da Indústria da Cana-de-Açúcar |
| GWh | Gigawatt-hora |
| SIN | Sistema Integrado Nacional |
| PROINFA | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia |
| MDL | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| COP | Acordo do Clima de Paris |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| UDOP | União Nacional da Bioenergia |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| PCS | Poder Calorífico Superior |
| PCI | Poder Calorífico Inferior |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| ASME | American Society of Mechanical Engineering |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas |

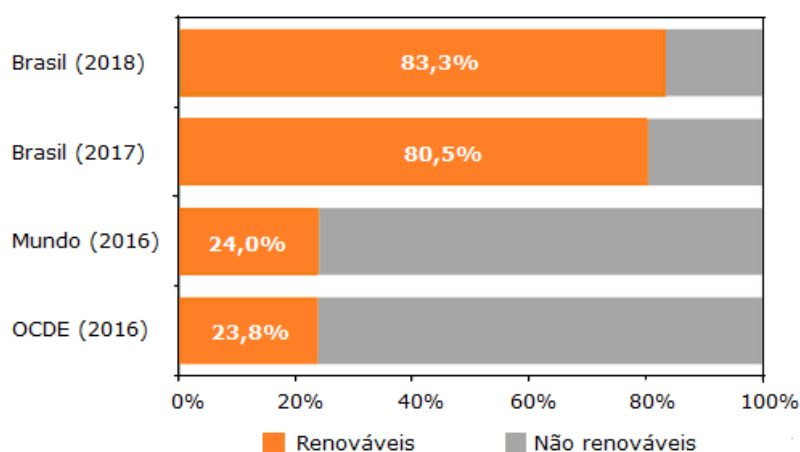
SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 4 |
| 2.1 Área cultivada de cana-de-açúcar | 4 |
| 2.2 Consumo de energia no Brasil | 8 |
| 2.3 Disponibilidade energética a partir da cana-de-açúcar | 9 |
| 2.4 Biomassa | 11 |
| 2.5 Caracterização da biomassa | 14 |
| 2.6 Poder calorífico | 16 |
| 3 CALDEIRA | 19 |
| 3.1 Caldeira Flamotubular | 20 |
| 3.2 Caldeira Aquatubular | 23 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 28 |
| 4.1 Eficiência pelo Método das Entradas e saídas | 29 |
| 4.2 Eficiência pelo Método do balanço de energia | 31 |
| 4.3 Eficiência com base no PCI e PCS | 31 |
| 4.4 Eficiência pelo Método do balanço de energia, base PCI | 32 |
| 4.4.1. Perda com gases de escape (q_2) | 33 |
| 4.4.2. Perda por combustão química incompleta (q_3) | 34 |
| 4.4.3. Perda por combustão mecânica incompleta (q_4) | 35 |
| 4.4.4. Perda de calor para o ambiente (q_5) | 36 |
| 4.4.5. Perda de calor das escórias e das cinzas (q_6) | 39 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 40 |
| CONCLUSÃO | 43 |
| REFERÊNCIAS | 45 |

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia elétrica é um ponto importante para o desenvolvimento industrial de um país, pois permite a expansão da atividade industrial e ao mesmo tempo outros setores da economia absorvem o resultado dessa atividade contribuindo também para o desenvolvimento econômico do país. O relatório síntese do Balanço Energético Nacional - BEN divulgado em 2019 que tem como base o ano de 2018, mostrou que a disponibilidade de energia interna no Brasil atingiu 288,4 Mtep (Megatonelada equivalente de petróleo) representando um decréscimo no período analisado de 1,7% em relação ao período anterior. Essa queda foi ocasionada em virtude do aumento das fontes hídricas e eólica na geração de energia elétrica e no declínio do consumo de energia nos seguintes setores: alimentos e bebidas – 17,4%, não ferrosos e outros setores da metalurgia – 20,2%, rodoviário – 1,2% e esse declínio trouxe para baixo também a disponibilidade interna de gás natural em – 5,4% e o petróleo e seus derivados em – 6,5%. Em sentido contrário a oferta interna de energia elétrica total teve um aumento de 10,7 TWh (Terawatt-hora) ficando em torno de 1,7% maior do que o ano de 2017 sendo puxada por uma parcela da geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis atingindo 83,3% em 2018 conforme mostra a figura 1.

Figura 1: Porcentagem de energia renovável e não renovável utilizada no Brasil e no Mundo.



Fonte: BEN (2019).

A divisão da oferta interna de energia OIE compreende em energia renovável 45,3% do total ofertado tendo como fonte e suas respectivas porcentagens representativas a energia hidráulica 12,6% considerando as importações, lenha e carvão vegetal 8,4%, lixo e outras fontes renováveis 6,9% e biomassa da cana 17,4%, conforme mostra a figura 2 (BEN 2019).

Figura 2: Porcentagem de energia renovável utilizada no Brasil.



Fonte: BEN (2019).

Já as fontes não renováveis representam 54,7% do total gerado compreendendo as fontes de carvão mineral com 5,8% de representatividade, gás natural 12,5%, urânio 1,4%, petróleo e derivados 34,4% e outras fontes não renováveis 0,6%, conforme mostra a figura 3 (BEN 2019).

Figura 3: Porcentagem de energia não renovável utilizada no Brasil.



Fonte: BEN (2019).

Com destaque entre as fontes de energia renováveis a biomassa oriunda do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um grande potencial na produção de energia elétrica e tem uma vasta área de cultivo no Brasil. Além da área cultivada outro fator favorável na produtividade do setor sucroalcooleiro que resulta em ganho na produção de energia elétrica é a diversidade de cultivares plantadas, o melhoramento das espécies e as características da região onde ela é cultivada. Segundo dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA 2018) o Brasil se destaca como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, esse título tem como base a quantidade de cana processada na safra 2017/2018, cerca de 641 milhões de toneladas. Dados divulgados pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA) mostram que do total processado 92,3% foi feito pela região Centro-Sul compreendida pelos Estados da região Sul, Sudeste e Centro-Oeste, já os 7,7% restante foi feito pelos Estados da região Norte-Nordeste, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1: Produção e moagem de cana, safra 2018/2019.

| Estado | Mil toneladas |
|------------------------------|----------------------|
| Acre | 0 |
| Alagoas | 16.202 |
| Amazonas | 237 |
| Bahia | 3.743 |
| Ceará | 0 |
| Espírito Santo | 3.174 |
| Goiás | 70.001 |
| Maranhão | 1.964 |
| Mato Grosso | 17.349 |
| Mato Grosso do Sul | 39 |
| Minas Gerais | 63.063 |
| Pará | 999 |
| Paraíba | 5.589 |
| Paraná | 35.641 |
| Pernambuco | 11.425 |
| Piauí | 1.167 |
| Rio de Janeiro | 1.058 |
| Rio Grande do Norte | 2.429 |
| Rio Grande do Sul | 39 |
| Rondônia | 31 |
| Santa Catarina | 0 |
| São Paulo | 333.294 |
| Sergipe | 1.896 |
| Tocantins | 2.024 |
| Região Centro-Sul | 573.125 |
| Região Norte-Nordeste | 47.707 |
| Brasil | 620.832 |

Fonte: UNICA (2019).

Ainda na década de 90 a crescente produção e utilização de energia elétrica através da biomassa foi impulsionado pelo extinto Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) e com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), sendo o último um dos mecanismos de flexibilização criados pelo Protocolo de Quioto para auxiliar o processo de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) ou de captura de carbono (ou sequestro de carbono). Ainda com base nos relatórios da UNICA (2019), a parcela do bagaço resultante do processamento da cana-de-açúcar aproveitado para a produção de energia elétrica (bioeletricidade) é de apenas 15% do potencial total. Se fosse utilizado toda a biomassa dos canaviais a bioeletricidade teria um potencial técnico para atingir 146 mil GWh, um valor significativo que em termos práticos atenderia mais de 30% da energia

consumida no Sistema Integrado Nacional (SIN). O estímulo da RenovaBio para melhorar o setor elétrico nacional tem papel fundamental no que diz respeito a utilização de fontes renováveis de energia, nesse contexto um dos destaques é a bioeletricidade de origem sucroenergética que apresenta um potencial para crescimento podendo ultrapassar a casa dos 50% até o ano de 2027, mudando o valor produzido de 21,5 mil GWh registrado em 2018 para 33,2 mil GWh até o ano considerado, mesmo com o crescimento de mais de 11,7 mil GWh ainda estaríamos utilizando somente 17% do potencial técnico dessa fonte.

A indústria canavieira em décadas passadas mais precisamente antes do século 21 não dava muita importância para o potencial energético da biomassa, ele era desperdiçado com a queima da palha na lavoura antes do corte da cana e o bagaço resultante da moagem era incinerado em caldeiras de baixa eficiência. Atualmente o bagaço juntamente com a palha são incinerados em caldeiras de alta eficiência proporcionando a geração de energia elétrica de maneira mais eficiente. A determinação da eficiência é um fator importante para controlar a produção de vapor e conseqüentemente sua utilização em turbinas para a produção de energia em centrais termelétrica. As quatro cultivares de cana utilizadas no trabalho se deve ao fato de serem uma das variedades mais plantadas no Estado de São Paulo que se destaca por ser o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil. Dentro dessas premissas, esse trabalho tem como objetivo estabelecer o fluxo de bagaço de cana-de-açúcar que deve ser inserido na câmara de combustão de uma caldeira industrial, determinar qual é o valor da energia fornecida por cada cultivar de cana-de-açúcar e calcular a eficiência térmica de uma caldeira do tipo aquatubular. O estudo é realizado com quatro cultivares de cana-de-açúcar, SP 80-1816, RB72-454, SP80-3280 e SP81-3250 visando encontrar qual cultivar será mais indicada como fonte primária de energia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Setor sucroenergético

O setor sucroenergético brasileiro tem papel importante na economia nacional na geração de riquezas. Estimativa feita os anos 2013-2014 mostrou que esse setor gerou uma contribuição para o PIB de aproximadamente de US\$ 43,3 bilhões, esse valor equivale aproximadamente 2% do PIB do Brasil. Considerando as vendas da cadeia produtiva do sistema agroindustrial ligados à cana o valor gerado sobe para US\$ 107,7 bilhões. Produtos que não são fontes principais de receita como por exemplo leveduras, bioplásticos, etanol celulósico e os créditos de carbono vão provocar o aumento desse valor por passar a ganhar

importância na geração de riquezas do setor. Além da geração de riquezas esse setor desempenha papel importante no empreendedorismo dos produtores rurais, na geração de renda e riqueza das regiões produtoras e a melhoria dos impactos ambientais ocupando lugar de destaque no ciclo do carbono (CASTRO, 2018).

Como maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e também como o segundo maior produtor e exportador de etanol do mundo o Brasil conta com aproximadamente 70.000 produtores rurais que fornecem cana-de-açúcar para a indústria, do total de cana fornecida foram processadas mais de 620 milhões de toneladas de cana na safra 2017/2018 em 365 usinas instaladas no País. Para cada hectare de cana é colhido em média 185 toneladas, assim a estimativa do PIB para essa safra ficou em torno de R\$ 85 bilhões trazendo como benefícios aproximadamente 800 mil postos de empregos diretos. Sendo o segundo setor agropecuário mais importante da balança comercial brasileira a indústria sucroenergética alcança cerca de 12 bilhões de dólares em exportações por ano (CASTRO, 2018).

Na região Centro - Sul concentra a maior produção de cana-de-açúcar correspondendo por aproximadamente 90% da produção nacional. Desse montante o Estado de São Paulo aparece com mais de 60% da produção nacional e mais de 70% das exportações, a região que mais contribui para esses índices é a de Ribeirão Preto respondendo por 45% do total produzido no estado. A cultura da cana-de-açúcar vem ganhando cada vez mais destaque no cenário socioeconômico nacional, o reflexo disso é o aumento nas áreas de cultivo da cana-de-açúcar. Os estados que vem aumentando sua área de cultivo são: Estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Paraná. A figura 4 ilustra as áreas onde se concentram a produção de cana-de-açúcar (ÚNICA, 2019).

Figura 4: Áreas de cultivo da cana-de-açúcar.



Fonte: IBGE, (2018).

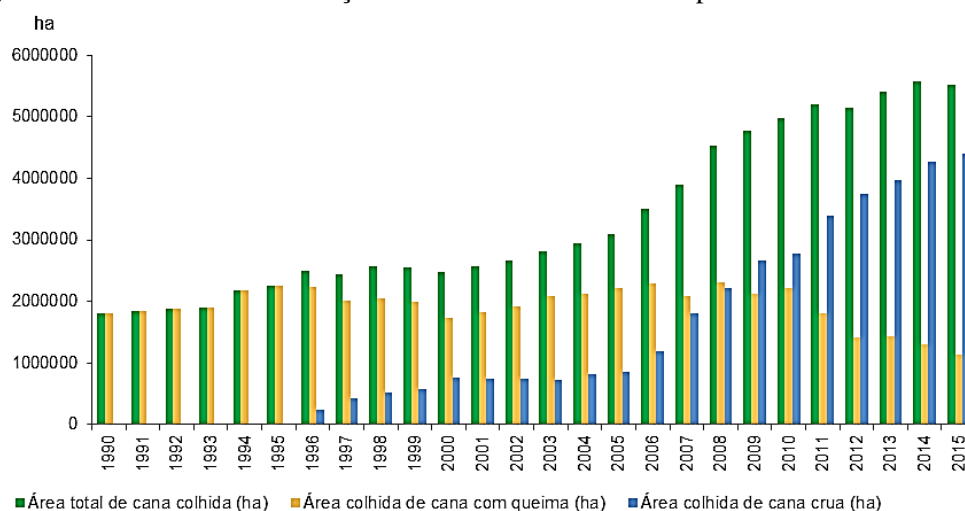
Do ponto de vista ecológico utilização do etanol como fonte energética no setor de transportes tem um papel fundamental no que diz respeito a redução na “pegada do carbono”, essa representa a medida que calcula a emissão de carbono equivalente emitida na atmosfera por uma pessoa, atividade, evento, empresa, organização ou evento. Em 2015 o Brasil assinou o Acordo do Clima de Paris (COP 21) para a redução na emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE em 43% até o ano de 2030 com referência as emissões feitas no ano de 2005, ao ser comparado com a gasolina o etanol evita em até 90% a emissão de CO₂ ao longo do seu ciclo de vida. Sua utilização na forma de anidro (27% misturado à gasolina) ou hidratado (direto na bomba) desde o ano de 2003 deixou de emitir 450 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, esse valor corresponde a emissões de países como Itália, Espanha e França. Não só o etanol ajuda a diminuir a emissão de GEE, outra energia limpa proveniente da cana-de-açúcar que contribui para não emissão de GEE é a Bioeletricidade produzida a partir do bagaço e da palha da planta. No ano de 2017 a energia produzida deixou de emitir 7,5

milhões de CO₂ na atmosfera, esse valor só seria alcançado se fosse cultivado 53 milhões de árvores nativas durante 20 anos (CASTRO, 2018).

Apesar dos benefícios da produção da cana-de-açúcar, uma questão muito comentada por críticos e ambientalistas são as queimadas da palha na plantação antes da colheita, a queima provoca emissão de gases de efeito estufa como por exemplo o gás carbônico (CO₂), como também o monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e a formação do ozônio (O₃), além da poluição do ar atmosférico pela fumaça e fuligem (Antunes, Azania e Azania, 2019).

Devido a mecanização da colheita da cana-de-açúcar que influencia diretamente na queda da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e tendo base o Estado de São Paulo como o maior produtor de cana, no período de 1990 e 2015, as emissões de GEE geradas pela colheita da cana-de-açúcar teve uma redução 44% no estado, conforme mostra a figura 5 (BIOAGÊNCIA, 2017).

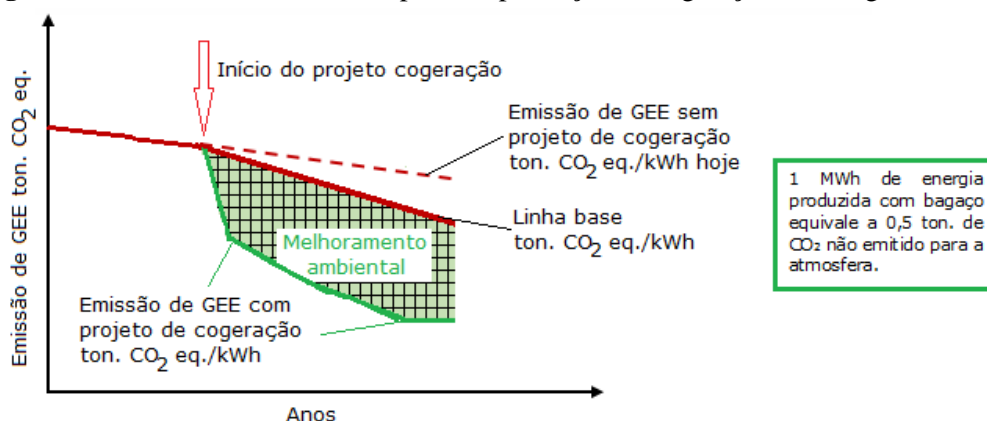
Figura 5: Colheita de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo período 1990-2015.



Fonte: BIOAGÊNCIA, (2017).

De acordo com a figura 5 houve uma mudança significativa na colheita da cana-de-açúcar que passou a ser colhida crua na maior parte da produção. Ainda sobre a emissão de gases, a queima da palha gera 9 kg de CO₂ por tonelada de cana, se a plantação de um hectare fosse queimada a emissão desse gás nessa área considerada seria de 1665 kg, já a fotossíntese retira aproximadamente 15 toneladas por hectare de CO₂. Com o advento da cogeração os índices de emissão de CO₂ baixaram significativamente como mostra a figura 6.

Figura 6: Níveis de CO₂ emitidos após a implantação da cogeração de energia.



Fonte: Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change, (2016), adaptado.

2.2 Consumo de energia no Brasil

Assim como o desenvolvimento econômico de um país as características como demografia, eficiência energética e a autoprodução são fatores que influenciam de maneira significativa no consumo de energia no Brasil. De acordo com a Empresa de Pesquisa energética (EPE), o consumo de energia elétrica no setor residencial depende por exemplo do número de domicílios ligados à rede elétrica e do número de habitantes por domicílio. Uma projeção para a década 2017 – 2026 sinaliza que a média nacional da taxa de crescimento populacional do período será de 0,6% ao ano. Outro fator importante é o consumo médio por consumidor que está intimamente ligado à renda com o Produto Interno Bruto (PIB) e com o PIB per capita. Esses fatores atuam indiretamente em outras fontes de consumo como por exemplo no setor de comércio e serviço a as classes de consumo que estão ligadas indiretamente a esses setores. A tabela 2 mostra o consumo final de energia por fonte (EPE, 2017).

Tabela 2: Participação no consumo final de energia, ano base 2018.

| Componente energético | Participação (%) |
|----------------------------|------------------|
| Querosene | 1,3 |
| Lixívia ¹ | 2,7 |
| Óleo combustível | 0,8 |
| GLP | 3,2 |
| Gasolina ² | 8,4 |
| Gás natural | 7,7 |
| Lenha | 6,6 |
| Bagaço da cana | 10,8 |
| Eletricidade | 18 |
| Óleo diesel ³ | 16,7 |
| Outras fontes ⁴ | 17,4 |

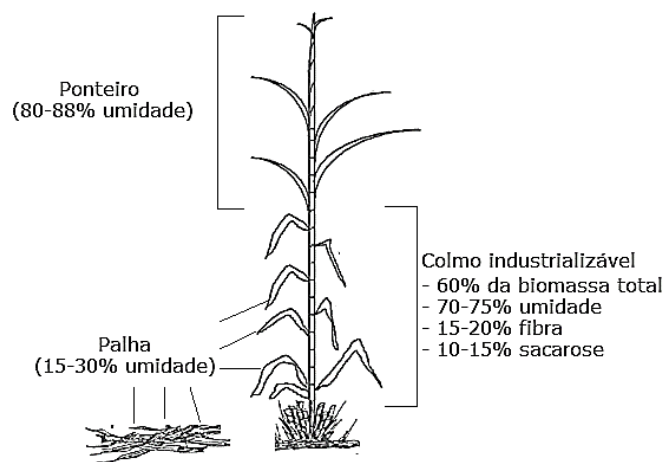
¹Lixívia - solução residuais de um processo industrial, por exemplo: lixívia negra ou licor negro é o resíduo que resulta do cozimento e da lavagem da celulose na indústria de papel. ²Inclui gasolina de aviação. ³Inclui biodiesel. ⁴Inclui gás de refinaria, coque de carvão mineral, de carvão vegetal e de petróleo, alcatrão, nafta, carvão mineral, outros energéticos de petróleo, asfalto, lubrificantes e solventes.

Fonte: BEN (2019), modificado.

2.3 Disponibilidade energética a partir da cana-de-açúcar

Segundo a União Nacional da Bioenergia (UDOP) a cana de açúcar é uma planta originária da nova Guiné local onde houve o primeiro contato com o homem que posteriormente transportou-a para a Índia. A cana-de-açúcar é uma planta pertencente ao gênero *Saccharum* apresentando a seguinte morfologia: colmos onde se concentra a sacarose, pontas e folhas que fazem parte da palha da cana. A figura 7 demonstra a morfologia da cana-de-açúcar com seus respectivos valores de umidade.

Figura 7: Aspectos morfológicos da cana-de-açúcar.

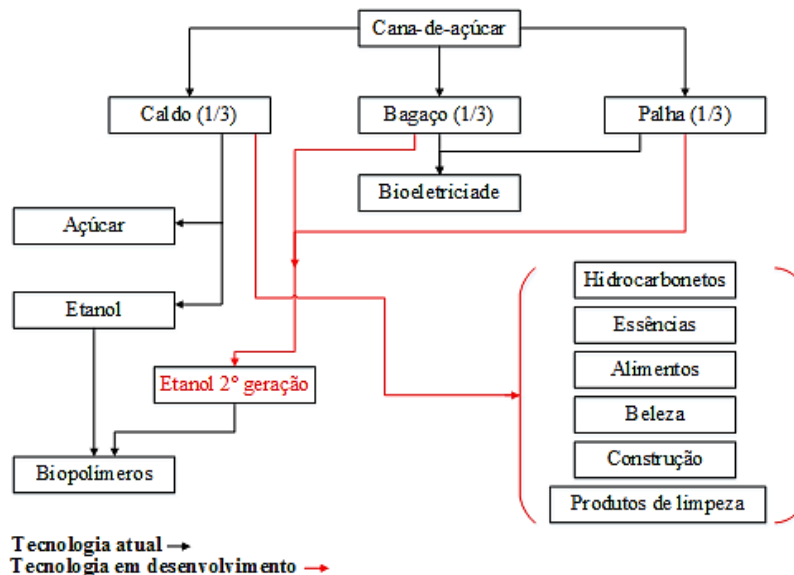


Fonte: Hassuani *et al.* (2005), adaptado.

A cana-de-açúcar plantada para fins energéticos pode ser aproveitada quase que na sua totalidade através de processos industriais como fonte energética. Nas usinas de açúcar

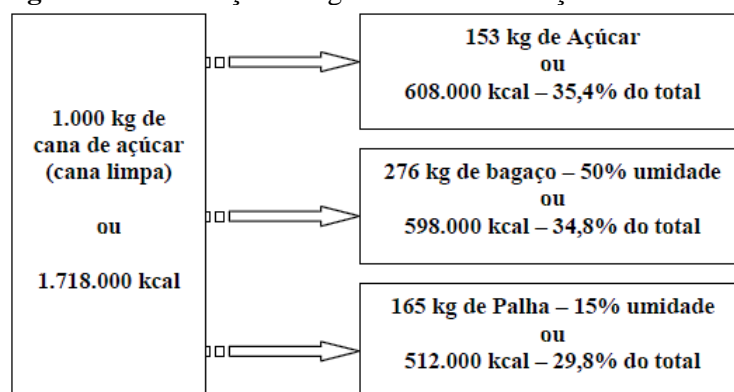
e álcool a utilização da cana para a produção de etanol resulta em 28% de bagaço. Energeticamente o bagaço equivale a 49,5% do total de energia proveniente da cana, o etanol 43,2% e o vinhoto 7,3%. Apresentando maior valor energético a utilização do bagaço ainda é falha nas usinas por ser utilizado em caldeiras de baixo eficiência ou na produção de vapor de baixa pressão (20 kgf/cm²). A produção desse vapor é utilizada em turbinas de contrapressão nos equipamentos de extração (63%) e na geração de eletricidade (37%), a maior parte do vapor de baixa pressão (2,5 kgf/cm²) proveniente das turbinas é utilizado no aquecimento do caldo (24%), nos aparelhos de destilação (61%) e os 15% restantes não é aproveitado. Além da geração de energia a figura 8 demonstra os principais produtos e subprodutos originários da cana-de-açúcar (ANEEL, [entre 2004 e 2010]).

Figura 8: Principais produtos originários da cana-de-açúcar.



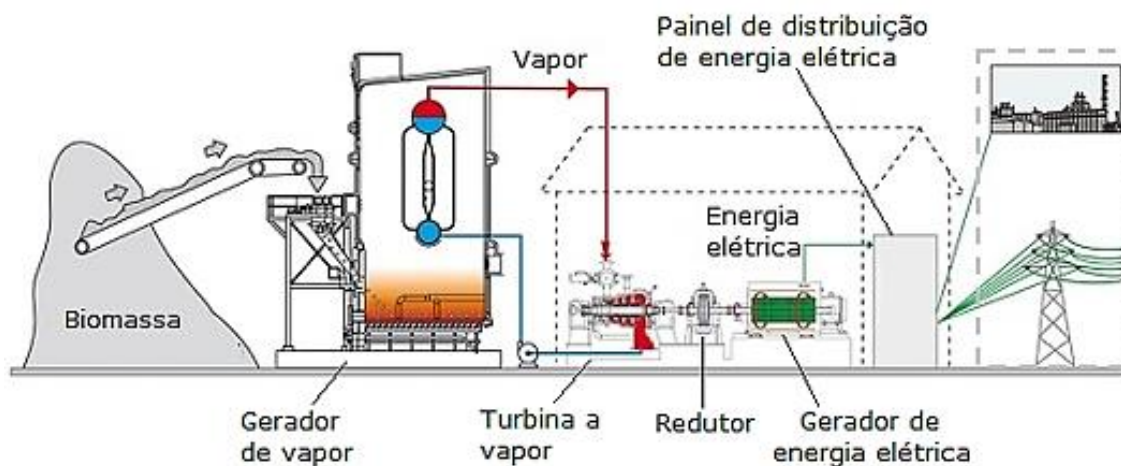
Fonte: adaptado de ASPECTOS (2019).

Na palha total as pontas e as folhas são incluídas e a umidade da palha total seca no campo em torno de 15%; O bagaço com 50% de umidade (valor médio obtido na saída do 6 terno de moenda). Com os dados apresentados anteriormente e com base na figura 5 o potencial gerado pelo caldo, bagaço e a palha, todos eles correspondendo a 1/3 da matriz, é distribuído conforme a figura 9.

Figura 9: Distribuição energética da cana-de-açúcar.

Fonte: Soares e Rossell (2006).

Reportado a tabela 1 a safra 2018/2019 teve uma moagem de 620,832 milhões de toneladas, energeticamente essa safra corresponde a 769,54 milhões de barris de petróleo, ou seja, 2,1 milhões de barris/dia, esse valor é próximo ao consumo nacional de petróleo que em junho de 2018 atingiu 2,723 milhões de barris/dia (SOARES; ROSSELL, 2006). A figura 10 mostra de maneira simplificada o caminho percorrido pela biomassa na geração de energia.

Figura 10: Geração de energia elétrica através da biomassa.

Fonte: TGM WEG Energia, adaptado.

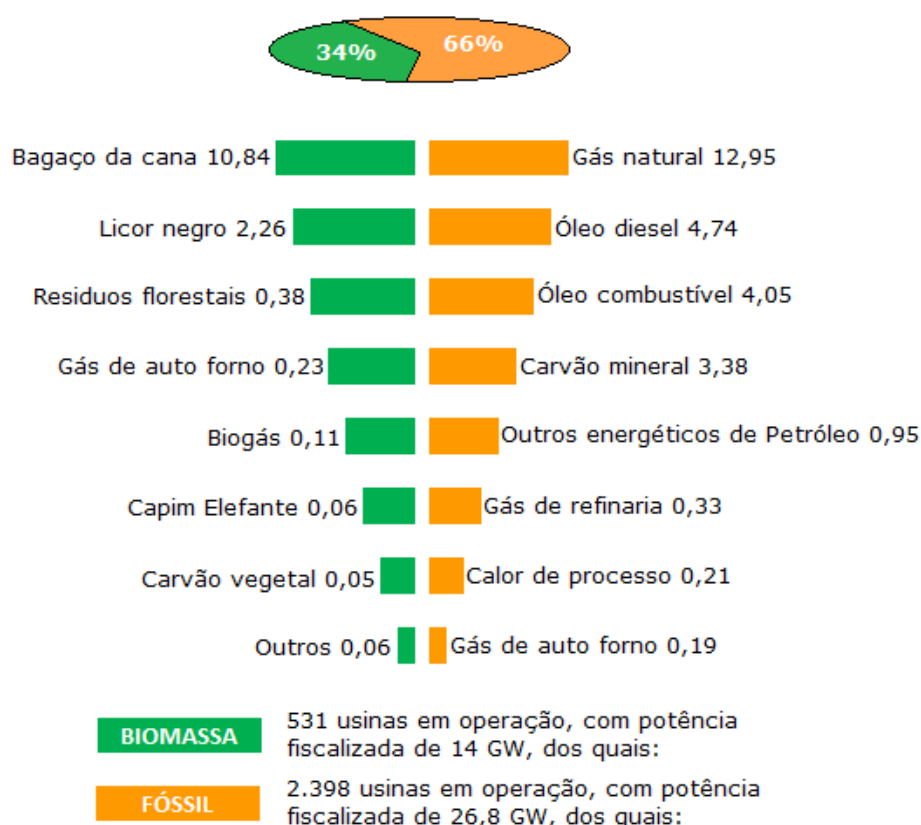
2.4 Biomassa

Para a concessão de novas plantas de produção de energia, a biomassa em termos energéticos é qualquer recurso proveniente de matéria orgânica podendo ser ela de origem animal ou vegetal, e ainda, pode ser utilizada como fonte indireta de energia para a produção de energia elétrica. Algumas fontes de energia renovável se apresentam de forma indireta como e o caso da biomassa de origem vegetal onde ocorre a conversão de energia solar em química através da fotossíntese proporcionando o desenvolvimento do vegetal. Apesar de

ser uma fonte energética com baixa eficiência sua utilização pode ser feita de forma direta através da combustão em fornos ou caldeiras para cogeração: produção de vapor (energia térmica) e energia elétrica a partir do ciclo Rankine com a utilização de turbinas a vapor. Com o intuito de melhorar o seu potencial energético técnicas de conversão de energia mais eficientes entraram em uso como por exemplo a gaseificação, que faz a conversão da biomassa em energia elétrica em um ciclo combinado de turbina a gás.

Um outro ponto positivo da utilização da biomassa como fonte energética é a diminuição da dependência no uso de combustíveis fósseis. Segundo ANEEL as usinas termelétricas possuem 41 GW de potência instalada, esse valor corresponde a 27% do total em operação no Brasil e aproximadamente um quarto desse total 10,8 GW utiliza o bagaço da cana-de-açúcar como fonte, como mostra a figura 11.

Figura 11: Geração de energia elétrica através da biomassa.



Fonte: ANEEL (2019).

O quadro 1 relaciona a capacidade instalada e gerada de energia elétrica no primeiro trimestre de 2019.

Quadro 1: Geração de energia elétrica por diversos setores.

| 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 | 404 | 11.400.822 | 6,5503 | 422 | 11.493.806 | 6,6038 | |
| | | Biogás-AGR | 3 | 7.951 | 0,0046 | | | | |
| | | Capim Elefante | 2 | 31.700 | 0,0182 | | | | |
| | | Casca de Arroz | 13 | 53.333 | 0,0306 | | | | |
| | Biocombustíveis líquidos | Etanol | 1 | 320 | 0,0002 | 3 | 4.670 | 0,0027 | |
| | | Óleos vegetais | 2 | 4.350 | 0,0025 | | | | |
| | Floresta | Carvão Vegetal | 8 | 48.197 | 0,0277 | 102 | 3.180.653 | 1,8274 | |
| | | Gás de Alto Forno - Biomassa | 12 | 127.705 | 0,0734 | | | | |
| | | Lenha | 6 | 39.915 | 0,0229 | | | | |
| | | Licor Negro | 18 | 2.530.719 | 1,4540 | | | | |
| | | Resíduos Florestais | 58 | 434.117 | 0,2494 | | | | |
| | Resíduos animais | Biogás - RA | 14 | 4.481 | 0,0026 | 14 | 4.481 | 0,0026 | |
| | Resíduos sólidos urbanos | Biogás - RU | 23 | 167.173 | 0,0960 | 25 | 172.423 | 0,0991 | |
| | | Carvão - RU | 2 | 5.250 | 0,0030 | | | | |
| Eólica | Cinética do vento | Cinética do vento | 615 | 15.079.493 | 8,6639 | 615 | 15.079.493 | 8,6639 | |
| Fóssil | Carvão mineral | Calor de Processo - CM | 2 | 28.400 | 0,0163 | 23 | 3.596.830 | 2,0666 | |
| | | Carvão Mineral | 13 | 3.202.740 | 1,8401 | | | | |
| | | Gás de Alto Forno - CM | 8 | 365.690 | 0,2101 | | | | |
| | | Calor de Processo - GN | 1 | 40.000 | 0,0230 | | | | |
| | Gás natural | Gás Natural | 166 | 13.315.333 | 7,6503 | 167 | 13.355.333 | 7,6733 | |
| | | Calor de Processo - OF | 4 | 165.970 | 0,0954 | | | | |
| | Outros Fósseis | Petróleo | Gás de Alto Forno - PE | 1 | 1.200 | 0,0007 | 2258 | 8.837.250 | 5,0774 |
| | | | Gás de Refinaria | 6 | 319.530 | 0,1836 | | | |
| | | | Óleo Combustível | 76 | 3.344.047 | 1,9213 | | | |
| | | | Óleo Diesel | 2158 | 4.149.145 | 2,3839 | | | |
| Outros Energéticos de Petróleo | | | 17 | 1.023.328 | 0,5880 | | | | |
| Hídrica | Potencial hidráulico | Potencial hidráulico | 1352 | 105.895.071 | 60,8420 | 1352 | 105.895.071 | 60,8420 | |
| Nuclear | Urânio | Urânio | 2 | 1.990.000 | 1,1434 | 2 | 1.990.000 | 1,1434 | |
| Solar | Radiação solar | Radiação solar | 2475 | 2.103.241 | 1,2084 | 2475 | 2.103.241 | 1,2084 | |
| Undi-Elétrica | Cinética da água | Cinética da água | 1 | 50 | 0,0000 | 1 | 50 | 0,0000 | |
| Importação | Paraguai | | | 5.650.000 | 3,2462 | | | 4,6940 | |
| | Argentina | | | 2.250.000 | 1,2927 | | | | |
| | Venezuela | | | 200.000 | 0,1149 | | | | |
| | Uruguai | | | 70.000 | 0,0402 | | | | |
| Total | | | 7463 | 174.049.271 | 100 | 7463 | 174.049.271 | 100 | |

Fonte: ANEEL (2019).

2.5 Caracterização da biomassa

A biomassa como fornecedora de recursos energéticos recebe diversas classificações, mas o fluxo energético dela são associados aos biocombustíveis que são descritos em três principais grupos de acordo com a origem da sua constituição sendo eles: biocombustíveis da madeira (Dendrocombustíveis), combustíveis de plantação não-florestal (Agrocombustíveis) e os resíduos urbanos. Ainda sobre a classificação da biomassa ela pode ser enquadrada em energéticos primários: quando os materiais ou produtos são obtidos diretamente da natureza como é o caso da lenha e da cana-de-açúcar; Secundários: resultado da conversão dos combustíveis primários como exemplos podemos citar o álcool proveniente da fermentação do caldo da cana e o carvão vegetal que é produzido a partir da madeira. O quadro 2 demonstra a biomassa de acordo com um dos seus critérios de classificação (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Quadro 2: Classificação dos biocombustíveis.

| Primeiro nível | Segundo nível | Conceito |
|---|---|---|
| Biocombustíveis da madeira (Dendrocombustíveis) | Combustíveis direto da madeira. | Madeira produzida para fins energéticos, usada direta ou indiretamente como combustível. |
| | Combustíveis indiretos da madeira. | Biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, subprodutos da exploração florestal e resultantes do processamento industrial da madeira para fins não-energéticos. |
| | Combustíveis de madeira recuperada. | Madeira usada diretamente ou indiretamente como combustível, derivada de atividades socioeconômicas que empregam produtos de origem florestal. |
| Biocombustíveis não-florestais (Agrocombustíveis) | Combustíveis de plantações energéticas. | Combustível sólido e líquido produzido a partir de plantações anuais exemplo: álcool da cana-de-açúcar. |
| | Subprodutos agrícolas. | Resíduos de colheita e outros tipos de subprodutos de culturas, como palhas e folhas. |
| | Subprodutos animais. | Esterco de aves, bovinos e suínos. |
| | Subprodutos agroindustriais. | Subprodutos agroindustriais como o bagaço da cana, licor negro e a casca de arroz. |
| Resíduos urbanos | | Resíduos sólidos e líquidos gerado em cidades e vilarejos. |

Fonte: modificado de CORTÊS, LORA e NASCIMENTO (2004).

A composição da biomassa proveniente da indústria sucroalcooleira é constituída basicamente de seis elementos químicos na sua fase orgânica são eles: carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, cloro e oxigênio. Já na fase inorgânica excluindo se os metais pesados outros dez elementos são encontrados como o silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio, potássio, enxofre, fósforo e titânio (JENKINS et al., 1998). O processamento da

biomassa na indústria dá origem a resíduos agrícolas e industriais. A colheita da cana sendo feita de forma mecanizada dá origem ao resíduo agrícola chamado palhiço, dele faz parte as palhas, folhas verdes, rebolos, raízes e possíveis ervas daninha que crescem no interior do canavial. Dos refugos industriais faz parte o bagaço, melaço, vinhaça, a torta de filtro e as cinzas (LOPES SILVA et al., 2014).

O bagaço originado depois da moagem da cana é um subproduto de alto valor podendo ser utilizado para outros fins como por exemplo na produção de papel ou ração animal, na indústria sucroalcooleira é muito utilizado como insumo na produção de vapor. Sua composição varia conforme o tipo de cultivares podendo conter 45 a 55% de água, 40 a 53% de fibra, 2 a 5% de sólidos dissolvidos e 1% de cinzas dissolvidas. Devido a essa variação é importante que os sistemas que utilizam essa fonte estejam “calibrados” de acordo com as suas características. A tabela 3 apresentam os valores máximos e mínimos da composição química do bagaço.

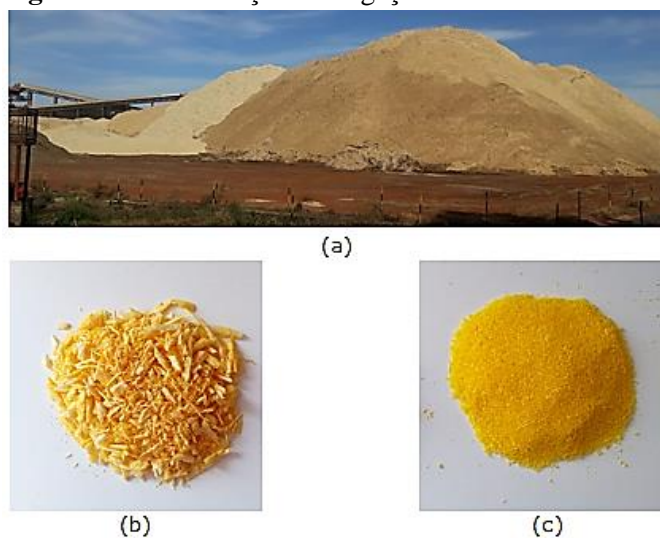
Tabela 3: Composição química do bagaço de cana-de-açúcar seco em %.

| Elemento químico | Valor médio | Valor máximo | Valor mínimo | Número de dados |
|------------------|-------------|--------------|--------------|-----------------|
| C | 47,2 | 49,1 | 44 | 9 |
| H | 6,3 | 7,4 | 5,8 | 9 |
| N | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 2 |
| O | 44,5 | 48 | 41,5 | 9 |
| S | 0,1 | | | 1 |
| Cinzas | 2,5 | 3,1 | 1 | 8 |

Fonte: Van der Poel et al. (1998).

É de suma importância a confirmação das características do bagaço da cana, esses parâmetros são necessários para a fabricação de equipamentos auxiliares na cogeração como por exemplo sistemas de alimentação do bagaço na caldeira (gerador de vapor), transportador pneumático e secador de bagaço. Independente do processo de extração do caldo da cana, ao ser verificado uma amostra do bagaço, dois grupos distintos serão observados. De acordo com Meirelles (1984) o primeiro grupo serão as fibras (partículas maiores) e o segundo é a medula ou pó (partículas menores), a figura 12 mostram as fibras e a medula.

Figura 12: Constituição do bagaço da cana.



(a) Descarte de bagaço; (b) Fibras do bagaço; (c) Medula ou pó do bagaço.

Fonte: Acervo do autor.

Resultado do processo de centrifugação na produção de açúcar o melaço pode ser utilizado na alimentação animal e como insumo para a produção de etanol. A água residual ou vinhaça é um coproduto da destilação do álcool que pode ser utilizado na produção de biogás (LOPES SILVA et al. 2014), em campo é muito utilizado como fertilizante (OMETTO et al., 2009). O processo de filtragem do caldo da cana dá origem à torta de filtro que pode ser utilizada como fertilizante ou para a produção de biogás (digestão anaeróbica) (CONTRERAS, 2009). A queima do bagaço nas caldeiras para cogeração dá origem as cinzas que servem como fertilizante (LOPES SILVA et al. 2014).

2.6 Poder calorífico

Segundo Cortez, Lora e Gómez (2008) poder calorífico de um energético qualquer é a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível medido em quilo Joule por quilograma (kJ/kg) ou em caloria por quilograma (cal/kg). De acordo com González (2015) o poder calorífico varia com a quantidade de umidade presente na biomassa e ele diferencia – se em dois tipos: Poder Calorífico Superior (PCS) que é a energia liberada em forma de calor na combustão completa de uma unidade mássica de combustível quando o vapor d'água originada durante a combustão é condensado. É o somatório da energia liberada na forma de calor e a energia gasta na evaporação d'água formada na oxidação; Poder Calorífico Inferior (PCI) que é somente a energia liberada na forma de calor, assumindo a água como produto da combustão como sendo vapor.

Na cogeração a temperatura dos gases de saída na maioria dos casos é maior do que a temperatura de condensação o que faz com que o PCI seja de maior aplicação. O poder calorífico superior é determinado através da utilização de bomba calorimétrica adiabática utilizando as técnicas padrão ASTM - *Standard Method for Gross Calorific Value of Solid Fuel* (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008). A tabela 4 exemplifica alguns valores do poder calorífico superior de diferentes biomassa considerando a base seca.

Tabela 4: Poder calorífico superior da biomassa (base seca).

| Biomassa | PCI (MJ/kg) |
|------------------------------|--------------------|
| Lenha verde* | 8,2 |
| Lenha seca ao ar* | 13,8 |
| Lenha seca em estufa* | 16,8 |
| Carvão vegetal | 30,8 |
| Carvão de resíduos agrícolas | 25,7 |
| Bagaço | 8,4 – 12,6 |
| Palha e casca de arroz | 13,4 |
| Pontas e caules | 13,4 |
| Esterco | 13,6 |
| Licor negro | 12,5 |
| Resíduos sólidos urbanos | 11,5 – 13,4 |

*Valores médios para diferentes tipos de lenha.

Fonte: LORA; NASCIMENTO, (2004).

Os cálculos que serão realizados nesse trabalho terá como base o PCS e PCI de cultivares do município de Taquarituba, Estado de São Paulo, onde foram realizados os experimentos necessários para encontrar os valores do PCS e PCI de quatro cultivares a saber: SP 80-1816, RB72-454, SP 80-3280 e SP81-32,50. As amostras foram colhidas coincidentemente com a data de colheita da cana-de-açúcar feita no mês de outubro do ano de 2007 e na ocasião do estudo foram colhidos 10 colmos por variedade (LIMA, 2009). Os resultados encontrados nesse experimento estão descritos na tabela 5.

Tabela 5: Poder calorífico das cultivares de cana pesquisadas.

| Cultivares | Volume de palhão (m³/t) | PCS - Poder calorífico superior (Mcal/t) | PCI - Poder calorífico inferior (Mcal/t) | Umidade % |
|-------------------|---|---|---|------------------|
| SP 80-1816 | 7,964 | 4582,70 | 4247,90 | 69,04 |
| RB72-454 | 8,610 | 4511,34 | 4176,79 | 70,57 |
| SP80-3280 | 9,369 | 4426,97 | 4092,17 | 69,60 |
| SP81-3250 | 10,619 | 4331,77 | 3996,97 | 69,13 |

Fonte: Modificado de LIMA (2009).

Na tabela 3 foram descritos os principais elementos químicos constituintes do bagaço da cana, na maioria dos casos é possível fazer uma análise dos elementos com um custo barato o que não se compara aos testes relativamente mais caros para encontrar o poder calorífico. Requerendo uma análise mais completa com base na composição química da amostra de bagaço e não tendo como base somente dados estatísticos foi proposto por Mendeliev uma expressão para o cálculo do poder calorífico inferior em kJ/kg (base de trabalho) a partir da composição elementar do combustível conforme a equação 1 (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

$$PCI^t = 339C^t + 1030H^t - 109(O^t - S^t) - 24W^t, (kJ/kg) \quad (1)$$

Onde:

O sobrescrito t significa ponto de trabalho;

PCI^t – poder calorífico inferior;

C^t, H^t, O^t e S^t – são as porcentagens dos elementos de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre na constituição do bagaço;

W^t – é a porcentagem de umidade no bagaço.

Ainda sobre o poder calorífico podemos utilizar a equação 2 para converter o poder calorífico de base seca para a base de trabalho (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

$$PCS^t = PCS^s (100 - W^t), (kJ/kg) \quad (2)$$

Onde:

O sobrescrito s significa base seca.

Para converter o poder calorífico superior de base seca para poder calorífico inferior de base de trabalho utiliza-se a equação 3 (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

$$PCI^t = \left\{ \left[PCS^s - \lambda (r + 0,09H^s) \right] \left(\frac{100 - W^t}{100} \right) \right\}, (kJ/kg) \quad (3)$$

Onde:

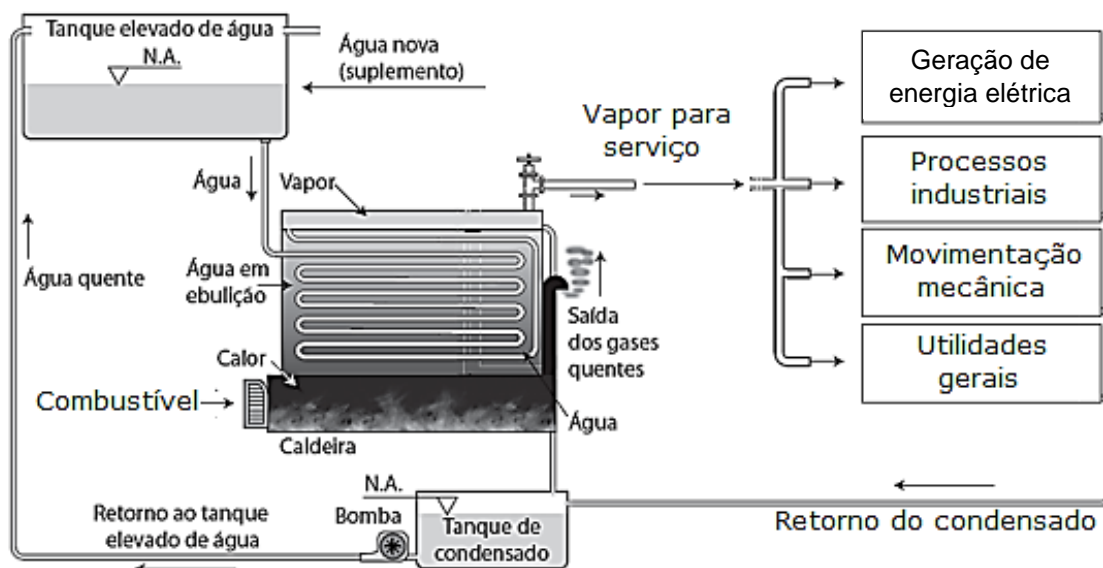
λ – calor latente da água = 2,31 MJ/kg a 25 °C.

r – composição elementar para transferência de base.

3 CALDEIRA

A utilização do calor está presente na vida do homem desde tempos remotos e essa energia não está restrita ao fogo. Industrialmente a obtenção da energia calorífica se faz através dos geradores de vapor ou caldeiras. O vapor é muito utilizado em vários setores industriais como por exemplo na indústria alimentícia, metalúrgica, química e no setor sucroalcooleiro. A disponibilidade de água próximo dos parques industriais é relativamente alta e como o vapor tem um alto calor específico ele é utilizado com a finalidade de aquecimento ou acionamento mecânico, e ainda, sua fácil obtenção e baixo custo fundamenta o seu uso em larga escala em processos industriais e em instalações que necessitam de energia proveniente do vapor. O gerador de calor ou caldeira é um trocador de calor que funciona com uma pressão superior à pressão atmosférica, ele produz vapor a partir da energia térmica fornecida por um determinado combustível podendo ser líquido, sólido ou gasoso. A figura 13 mostra um esquema básico de uma caldeira e suas funcionalidades.

Figura 13: Esquema básico de um gerador de vapor e suas funcionalidades.



Fonte: modificado de BOTELHO (2011).

Há dois tipos de caldeiras, a flamotubular e a aquatubular, elas podem receber diversas classificações quanto a sua empregabilidade e uso, o quadro 3 apresenta algumas das classificações mais importantes.

Quadro 3: Classificação das caldeiras de acordo com a aplicabilidade.

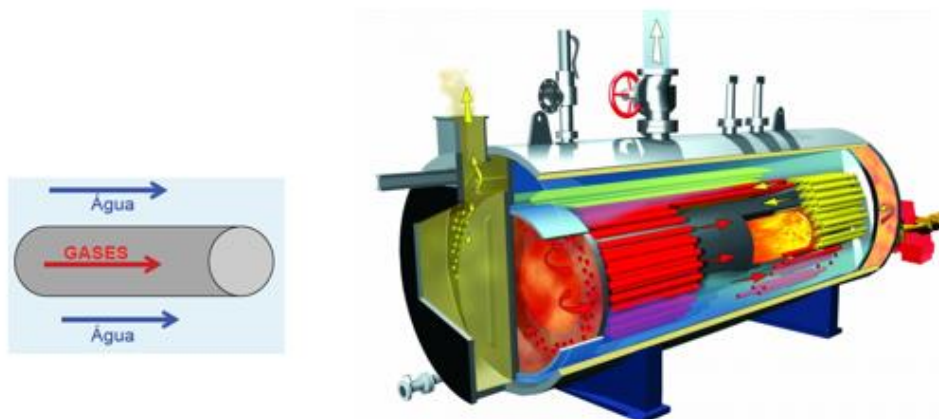
| Tipo de caldeira | Localização água/gases | Energia empregue no aquecimento | | Outras classificações | |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|-----------------------|---|
| | | Flamotubular | Verticais ou horizontais | Combustível | Sólido, líquido ou gasoso |
| Fornalha corrugada ou lisa | | | | | |
| Traseira seca ou molhada | Elétrica | | Jato d'água, eletrodo submerso e resistências | Sustentação | Auto sustentadas e mistas |
| Aquatubular | Tubos retos ou curvos | Caldeira de recuperação | Gases de recuperação, outros processos, produção de soda ou licor negro | Circulação de água | Natural, forçada e combinada |
| | Perfil A, D, O | | | | |
| | Lâmina, cortina ou parede d'água | | | Tiragem | Natural, forçada e balanceada ou induzida |

Fonte: Acervo do autor.

3.1 Caldeira Flamotubular

Um dos geradores de vapor mais utilizados na indústria as caldeiras flamotubulares não necessitam trabalhar com pressão de vapor e vazão elevadas, não necessitam de espaços consideráveis, podem ser posicionadas verticalmente quando necessário e seu custo é relativamente baixo. O princípio de funcionamento desses geradores é trocar calor com a água de maneira que os gases originados da combustão circulem no interior de tubos e a água que está ao seu redor se aqueça, conforme mostra a figura 14 (BOTELHO, 2011).

Figura 14: Esquema básico de um gerador de vapor flamotubular.



Fonte: BOTELHO (2011).

Nesse modelo de gerador de vapor para pequenas capacidades utiliza – se o modelo vertical com a utilização de vapor saturado ou supersaturado com produção de 160 até 50.000 kg/h de vapor e pressões que podem ir de 10 até 18 bar, produzindo de 112 a 34.000 kW. Usualmente ocorre o emprego das caldeiras horizontais que limitam a vazão de vapor em 13 ton./h e pressões de até 14 kgf/cm². O quadro 4 mostram algumas vantagens e desvantagens desse tipo de caldeira.

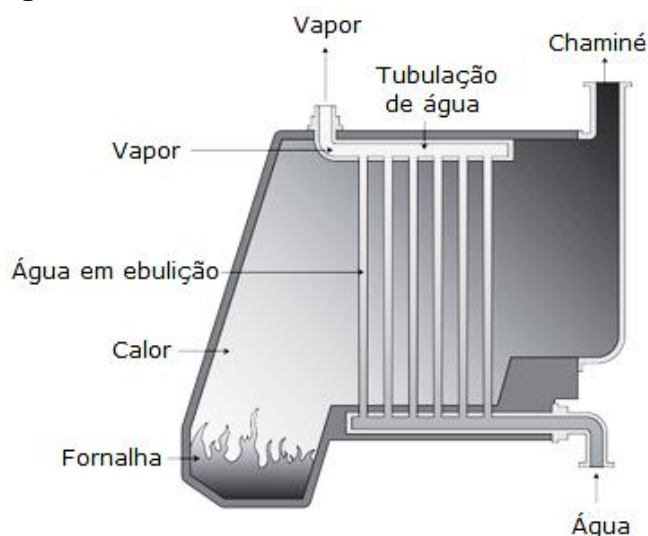
Quadro 4: Vantagens e desvantagens da caldeira flamotubular.

| Tipo de caldeira | Vantagens | Desvantagens |
|---------------------------------|--|---|
| Flamotubular | Baixo custo de aquisição | Baixo eficiência térmico |
| | Exige pouca alvenaria | Partida lenta devido ao grande volume interno de água |
| | | Limite de pressão (aprox. 15 kgf/cm ²) |
| | Bom atendimento a aumentos de demanda de vapor | Dificuldade para a instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor |
| Capacidade de produção limitada | | |

Fonte: BOTELHO (2011).

A construção de caldeiras desse modelo é um pouco mais simples e pode receber a classificação quanto à distribuição dos tubos, podendo ser de tubos verticais ou horizontais. A caldeira de tubo vertical é construída de maneira que os tubos ficam dispostos verticalmente numa parte cilíndrica fechadas por placas na extremidade, a fornalha fica na parte cilíndrica BOTELHO (2011). Após a queima do combustível os gases de combustão passam pelos tubos aquecendo a água que envolve os tubos, quando a fornalha é construída na parte externa nesse tipo de caldeira o combustível a ser utilizado para queima é de baixo poder calorífico como por exemplo: palha, serragem, licor negro, casca de café, amendoim e óleos pesados, a figura 15 mostra um modelo de caldeira de tubo vertical.

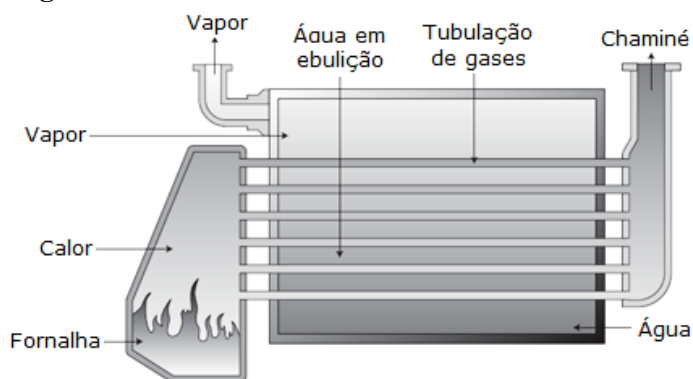
Figura 15: Caldeira de tubos verticais.



Fonte: BOTELHO (2011).

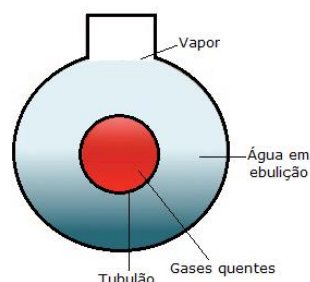
Com tipos diferenciados de construção as caldeiras de tubos horizontais podem variar desde os tipos Cornuália e Lancaster apresentando considerável volume da água, aos modelos mais atuais que são produzidos em unidades compactas. Esses modelos apresentam de 1 a 4 tubulões por fornalha onde ocorre a combustão, a figura 16 mostra o esquema de uma caldeira de tubos horizontais BOTELHO (2011).

Figura 16: Caldeira de tubos horizontais.



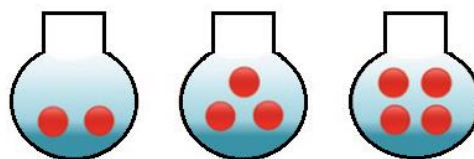
Fonte: BOTELHO (2011).

A caldeira Cornuália como mostra a figura 17 foi um dos primeiros modelos a entrar em operação, seu funcionamento é muito simples mas apesar disso tem uma eficiência baixa e a pressão máxima de trabalho fica em torno de 10 kgf/cm² com uma vaporização de 12 a 14 kg de vapor/m² e a sua superfície não ultrapassa 100 m² BOTELHO (2011).

Figura 17: Caldeira Cornuália.

Fonte: BOTELHO (2011), modificado.

De construção semelhante a Cornuália a caldeira Lancaster apresentou evoluções técnicas, construída com dois a quatro tubulões internos e área de troca térmica útil variando entre 120 a 140 m² com vaporização de 15 a 18 kg de vapor/m². Uma das evoluções presentes é a tubulação de fogo e de retorno que melhora no eficiência térmico em relação à caldeira anterior, como mostra a figura 18 (BOTELHO, 2011).

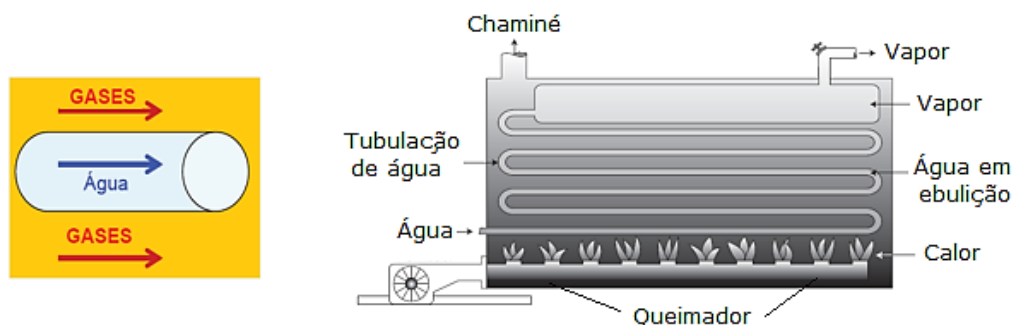
Figura 18: Caldeira Lancaster.

Fonte: BOTELHO (2011).

3.2 Caldeira Aquatubular

As caldeiras aquatubulares trabalham com a circulação de gases quentes pela parte externa dos tubos e a água passa pela parte interna deles, essas tubulações ficam dispostas como se fossem paredes de água ou feixes tubulares. Essa alteração na configuração permite que as partes onde estarão as maiores pressões tenham diâmetro reduzido fazendo com que possam ser alcançados maiores valores na pressão porém, para o bom funcionamento desse modelo é necessário que se tenha um maior controle das variáveis do processo. Esse tipo de caldeira é mais difícil de ser construída e no âmbito da sua operação gera alta quantidade de vapor podendo chegar a 750 ton/h mas usualmente a quantidade de vapor fica entre 15 e 150 ton/h com uma pressão alta de operação fiando em torno de 90 kgf/cm² a 100 kgf/cm², a figura 19 ilustra o princípio de funcionamento e um modelo de caldeira aquatubular (BOTELHO, 2011).

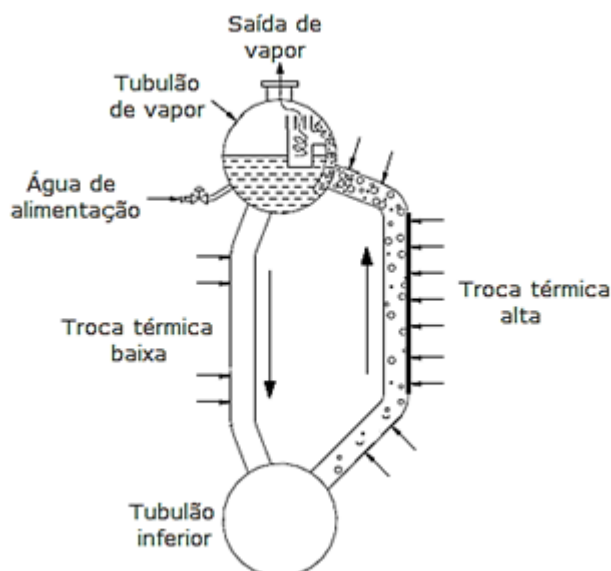
Figura 19: Caldeira aquatubular.



Fonte: BOTELHO (2011).

A caldeira flamotubular tem como um dos princípios de funcionamento a circulação de água pela tubulação e maior parte dessas caldeiras trabalham com circulação natural causada pela diferença de densidade quando a água é aquecida até chegar na mistura água-vapor. A diferença de densidade ocasiona o deslocamento descendente de água no sentido do tubulão inferior (tubulão de lama) ao passo que do outro lado acontecerá o fluxo ascendente de mistura água-vapor para o tubulão de vapor (superior). Esse movimento cíclico é facilitado pela alimentação contínua de água, saída do vapor e escoamento dos gases quentes, a figura 20 mostra o sentido de circulação da água dentro das tubulações de uma caldeira com circulação de água natural (SANTINI; TELHADO, 2015).

Figura 20: Circulação de água natural.

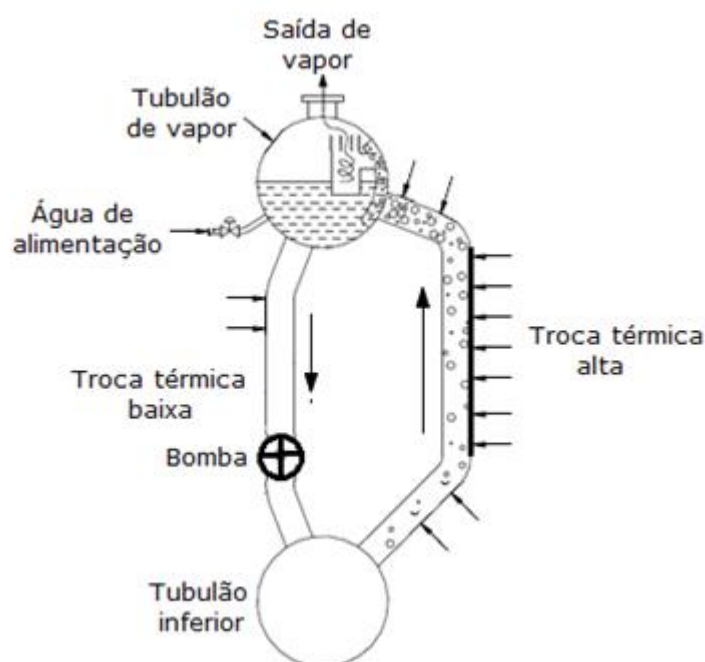


Fonte: modificado de SANTINI e TELHADO (2015).

Nas caldeiras que trabalham com alta pressão a diferença de densidade decresce assim como a mistura água-vapor diminui bastante fazendo com que a circulação natural se torne lenta, para manter a circulação de água é feito a instalação de uma bomba para manter

a demanda de vapor suficientemente maior do que se fosse com circulação natural, como mostra a figura 21. Essa medida faz com que as caldeiras aquatubulares atendam às necessidades de aplicação como consumo alto de vapor, alta pressão de vapor ou vapor superaquecido (SANTINI; TELHADO, 2015).

Figura 21: Circulação de água forçada.

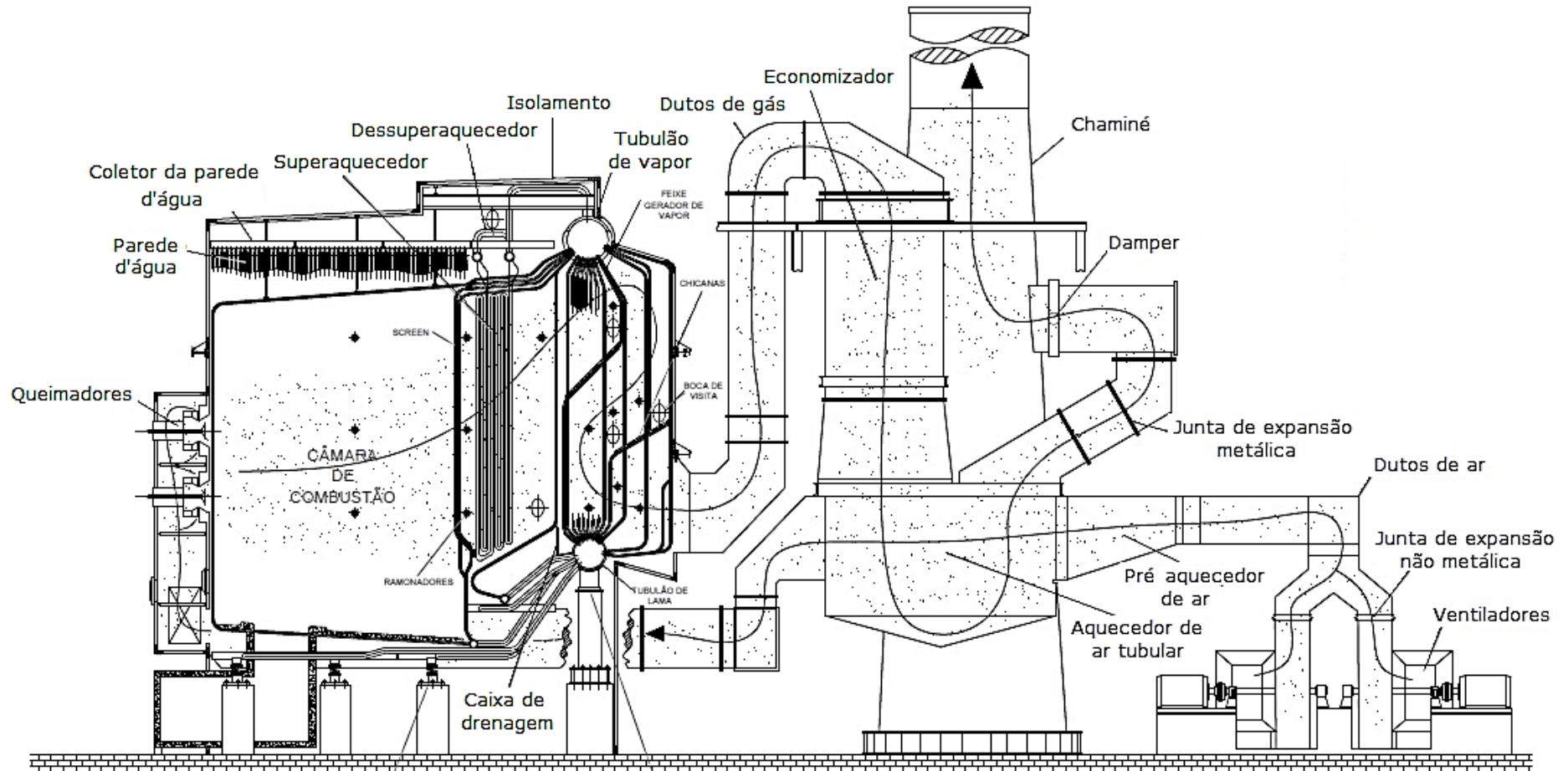


Fonte: modificado de SANTINI e TELHADO (2015).

O macroprocesso de produção de vapor em uma caldeira aquatubular começa com a alimentação da água em baixa temperatura que é bombeada para o economizador realizando a primeira troca de calor para aumentar a temperatura permitindo a mistura de água aquecida com o sistema gerador de vapor, essa etapa é necessária para evitar o choque térmico e as possíveis flutuações de temperatura. Continuando o ciclo a água do tubulão de vapor seguirá para o tubulão inferior pelos tubos com temperatura pouco elevadas, após chegar ao tubulão inferior a água aquecida passará pelos tubos mais quentes havendo a transformação parcial da água em vapor saturado seguindo um escoamento bifásico até chegar no tubulão de vapor (SANTINI; TELHADO, 2015).

No superaquecedor há serpentinas que fazem com que o vapor saturado receba calor proveniente dos gases de combustão aumentando sua temperatura tornando se vapor superaquecido. A energia necessária para produzir esse vapor vem da queima de combustíveis ou biocombustível, como exemplo a figura 22 mostra uma caldeira aquatubular que utiliza como combustível óleo ou gás (SANTINI; TELHADO, 2015).

Figura 22: Caldeira aquatubular.



Fonte: SANTINI; TELHADO (2015).

Ainda sobre a figura 22, a alimentação de ar na caldeira é feita por ventiladores e descarregado por dutos de ar fazendo com que ele chegue até os queimadores misturando com o combustível promovendo a combustão no interior da câmara de combustão. Os gases resultantes da combustão (quentes) sairão pela chaminé em temperatura relativamente baixa. Eles promoverão a troca de calor por convecção nas partes subsequentes da câmara de combustão pois nela, além dessa troca térmica por convecção (menor quantidade) há a troca térmica por radiação (maior quantidade). Os gases produzidos na combustão passam forçadamente por chicanas no interior dos tubos melhorando a distribuição dos gases aumentando a eficiência térmica gás-tubos, após essa passagem os gases em temperatura menor passam pelo economizador aquecendo a água de alimentação e no aquecedor de ar (SANTINI; TELHADO, 2015).

As vantagens desse modelo de caldeira é a possibilidade de trabalhar com pressões entre 50 e 165 bar, produz vapor rapidamente, rapidez no arranque e facilidade de adaptação a diferentes tipos de combustíveis. Dentre as desvantagens ganham destaque as grandes dimensões, sensibilidade a variações bruscas de carga, alta exigência na qualidade da água de alimentação devido à pressão elevada de funcionamento, alto custo de instalação e complexidade na montagem (BOTELHO, 2011).

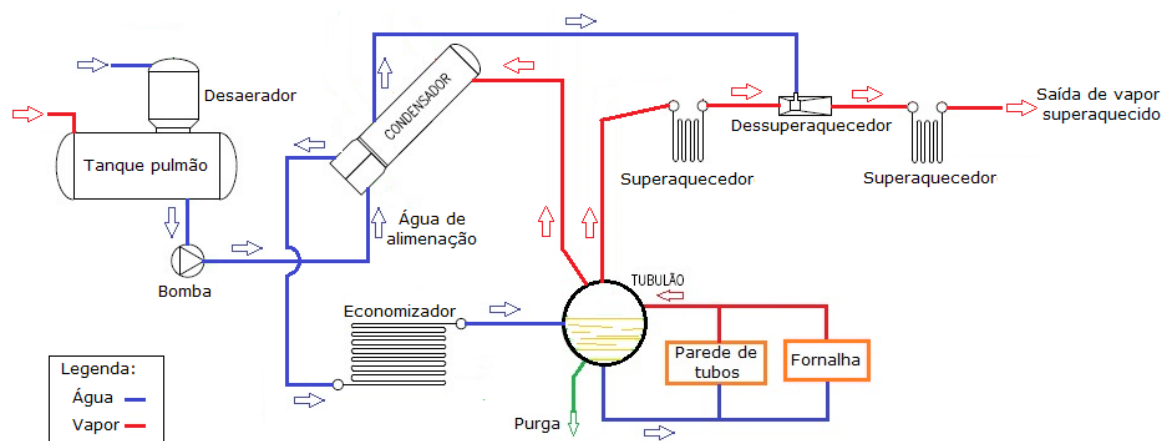
4 MATERIAL E MÉTODOS

A análise que será feita nesse trabalho terá como base medições feitas por membros de grupos de pesquisa, os cálculos que serão feitos para determinar a eficiência da caldeira terá dados da queima da biomassa originados na pesquisa feita por Lima (2009) que na ocasião analisou quatro cultivares de cana-de-açúcar, SP 80-1816, RB72-454, SP80-3280 e SP81-3250 que foram apresentadas na tabela 5 juntamente com os dados que serão utilizados nos cálculos desse trabalho. No Brasil não há uma metodologia normalizada para o cálculo da eficiência de caldeira. Os cálculos e testes são baseados em normas internacionais como a norma ASME (American Society of Mechanical Engineering), sendo utilizada em análises como por exemplo para verificação de desempenho, capacidade e características de operação de caldeiras, ou, ainda, para comparar se o equipamento está de acordo com a condição padrão de operação (CAMARGO, 1990).

A eficiência térmica de uma caldeira pode ser expressa como a eficiência bruta ou líquida, ela pode ser calculada como a razão entre a energia transferida para a água para transformá-la em vapor. A determinação da eficiência térmica pela primeira lei da termodinâmica utiliza dois métodos: o das Entradas e Saídas e o Balanço de Energia tendo como base de cálculo o PCI e PCS. Ao determinar a eficiência de uma caldeira que apresenta pressão e temperatura em torno de 2,1 MPa e 300°C respectivamente, o comportamento pode ser semelhante ao de uma que apresenta pressão e temperatura em torno de 9 MPa e 520 °C (ARNAO, 2007).

Para o cálculo da eficiência da caldeira serão utilizados parâmetros similares ao de uma caldeira atual. A produção de vapor da caldeira utilizada como modelo será 300.000 kg/h a uma temperatura de 520 °C com uma pressão de trabalho igual a 6,7 Mpa. O gás resultante da combustão terá uma temperatura de 160°C e o rendimento estimado do PCI será de 90%. A alimentação de bagaço de cana-de-açúcar na câmara de combustão será feita por esteiras, o consumo de bagaço necessário nessa caldeira para manter as características operacionais será determinado através da divisão do calor total transferido pelo combustível que no modelo estudado é igual a 991.858,2 MJ/h (valor determinado pelo balanço de massa) pelo PCI do bagaço em base úmida. Na linha de alimentação da água e do vapor dessa caldeira tem instalado um desaerador, um economizador (pré-aquecedor de água) e um condensador (subcooler). De acordo com SAMPAIO (2015), a figura 23 demonstra o esquema simplificado da caldeira utilizada nesse estudo.

Figura 23: Diagrama de água e vapor na caldeira em estudo.



Fonte: adaptado de SAMPAIO (2015).

Os métodos para se determinar a eficiência térmica da caldeira em estudo serão apresentados a seguir.

4.1 Método das Entradas e saídas

A determinação da eficiência por meio desse método que também é denominado de eficiência bruta é alcançada empregando a equação 4.

$$\eta_b = \frac{Q_u}{Q_d} \times 100(\%) \quad (4)$$

Onde:

η_b – é a eficiência da caldeira.

Q_u – é a quantidade de calor útil.

Q_d – é a quantidade de calor disponível.

O calor útil é a energia transferida à substância de trabalho considerando os seguintes dados: energia consumida para a evaporação da água de alimentação e o superaquecimento do vapor até as condições de pressão e temperatura requeridas; energia contida nas águas de extração contínuas (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

O cálculo do calor útil (Q_u) é obtido utilizando-se da equação 5.

$$Q_u = \left[\frac{\dot{m}_{vs}}{C} (h_{vs} - h_{aa}) + \frac{\dot{m}_e}{C} (h_e - h_{aa}) \right] (kJ/kg) \quad (5)$$

Onde:

m_{vs} – é o fluxo de vapor superaquecido, kJ/kg;
 m_e – é o fluxo de extrações contínuas, kg/s;
 h_{vs} – é a entalpia do vapor superaquecido, kJ/kg;
 h_{aa} – é a entalpia da água de alimentação, kJ/kg;
 h_e – é a entalpia da água das extrações contínuas, kJ/kg;
 C – é o fluxo mássico de combustível, kg/s.

Segundo Cortez, Lora e Gómes (2008), a determinação da entalpia das extrações é determinada como entalpia da água correspondente à temperatura de saturação para a pressão dentro do balão superior da caldeira. Se por ventura o valor for menor do que 2% o segundo membro da equação pode ser desprezado e a fração de extração é calculada fazendo-se uso da equação 6.

$$f_e = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_{vs}} \cdot 100, (\%) \quad (6)$$

O calor disponível determinado por unidade de massa de combustível (kg) é calculado servindo-se da equação 7.

$$Q_d^t = PCI^t + Q_{fc} + Q_{paa} + Q_{at}, (kJ/kg) \quad (7)$$

Onde:

Q_{fc} – é o calor físico do combustível;

Q_{paa} – é o calor introduzido na fornalha pelo ar aquecido fora da caldeira (em caldeiras de biomassa, usualmente, $Q_{paa} = 0$);

Q_{at} – é o calor introduzido na fornalha pelo vapor de atomização (considerado apenas em caldeiras que queimam combustíveis líquidos);

O calor físico do combustível é calculado via equação 8.

$$Q_{fc} = C_c \cdot T_c, (kJ/kg) \quad (8)$$

Onde:

C_c – é o calor específico do combustível kJ/kg.K;

T_c – é a temperatura com que o combustível é alimentado na fornalha, °C (em usinas de açúcar geralmente o bagaço alimentado diretamente da moenda chega em torno de 50 °C).

4.2 Método do balanço de energia

A determinação por esse método acontece pelo arranjo da equação 8, com a equação 3 resultando na equação 9.

$$Entrada = saída + perdas \quad (8)$$

Dividindo a equação 8 pelas entradas resulta em:

$$\eta = 1 - \left(\frac{Perdas}{Entrada} \right) \times 100(\%) \quad (9)$$

Na equação 9 as perdas são: energia perdida com gases de exaustão, radiação, convecção incluindo as paredes da caldeira e combustível não queimado. A entrada é determinada da mesma forma que no método direto. O cálculo da eficiência da caldeira por esse método obriga encontrar o tipo e o valor de todas as perdas energéticas. As medições iniciais para o cálculo da eficiência nesse caso devem ser as seguintes: análise química do combustível como o teor de carbono, hidrogênio e nitrogênio; determinação da umidade do bagaço e a presença de cinzas; temperatura dos fluxos de ar dos gases na entrada e na saída da caldeira; medição de CO, NO_x e O₂, arraste de não queimados nos gases de exaustão da caldeira; presença de não queimados nas cinzas da fornalha (ARNAO, 2007).

4.3 Eficiência com base no PCI e PCS

Ainda considerando a eficiência pelo método das entradas e saídas a eficiência do gerador de vapor pode ser avaliado pelo PCI determinado pela equação 10 e pelo PCS calculado pela equação 11.

$$\eta = \left[\frac{m_s \cdot (h_{soc} - h_{wic})}{m_b \cdot PCI_b} \right] \times 100(\%) \quad (10)$$

$$\eta = \left[\frac{m_s \cdot (h_{soc} - h_{wic})}{m_b \cdot PCS_b} \right] \times 100(\%) \quad (11)$$

Onde:

m_s – é a vazão do vapor na saída da caldeira, kg/s;

h_{soc} – é a entalpia específica do vapor na saída da caldeira, kJ/kg;

h_{wic} – é a entalpia específica da água na entrada da caldeira, kJ/kg;

m_b – é a vazão de bagaço na entrada da caldeira, kg/s;

PCI_b – é o Poder Calorífico Inferior do bagaço, kJ/kg;

PCS_b – é o Poder Calorífico Superior do bagaço, kJ/kg.

4.4 Método do balanço de energia, base PCI

A eficiência do gerador de vapor por esse método é determinado pelo balanço térmico da caldeira, calculado pela equação 12.

$$Q_d^t = Q_u + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, kJ/kg \quad (12)$$

Dividindo a expressão por Q_d^t e multiplicando por 100 resulta em:

$$100 = q_u + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \% \quad (13)$$

Combinando a equação 3 com a equação 13 a eficiência poderá ser calculada com a equação 14.

$$\eta_b = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (14)$$

Onde os valores de q representam as perdas energéticas:

q_2 – com os gases de exaustão;

q_3 – pela combustão química incompleta;

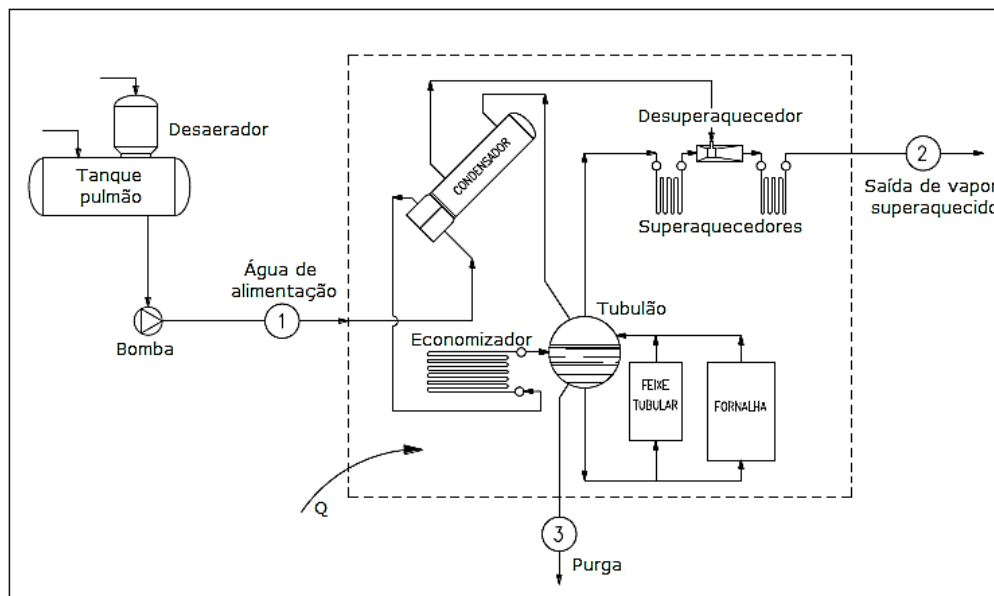
q_4 – pela combustão mecânica incompleta;

q_5 – para o meio ambiente através das paredes da caldeira;

q_6 – com o calor das escoras e das cinzas;

O cálculo do eficiência térmica pode ser efetuado dispondo-se da equação 4. Esse cálculo é o do balanço térmico direto, já o cálculo realizado pelo uso da equação 14 representa o balanço térmico indireto. A figura 24 mostra o volume de controle da caldeira a vapor para a queima de bagaço da cana-de-açúcar.

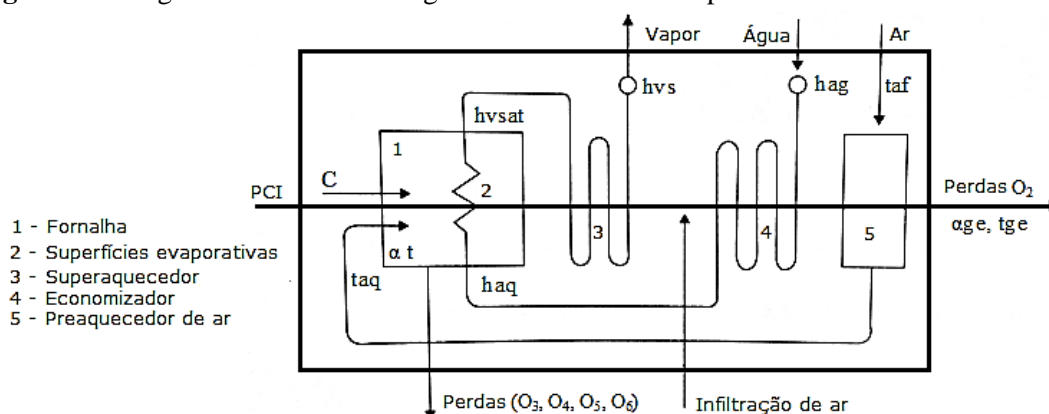
Figura 24: Volume de controle de uma caldeira a vapor.



Fonte: SAMPAIO (2015).

Para utilizar o método direto é necessário que se conheça o fluxo de combustível. Nesse caso o limite do cálculo se restringe a caldeiras que utilizam combustíveis líquidos e gasosos. Para caldeiras que utilizam combustíveis sólidos só se aplica o método indireto porque nesse caso há dificuldade em monitorar o fluxo de combustível. Esse método ainda tem como vantagem de mostrar quantitativamente as fontes que apresentam baixa eficiência (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008). A figura 25 apresenta um diagrama de fluxo de massa e energia de uma caldeira a vapor.

Figura 25: Diagrama de massa e energia de uma caldeira a vapor.



Fonte: CORTEZ; LORA; GÓMES (2008).

4.4.1 Perda com gases de escape (q_2)

Essa perda é a mais importante dentre as perdas utilizadas nos cálculos, pois é a maior de todas. Ela depende da temperatura dos gases (t_{ge}) e do coeficiente de excesso de ar (α_{ge}). O abaixamento dessa temperatura em $14\text{ }^\circ\text{C}$ a $15\text{ }^\circ\text{C}$ diminui o seu valor e como

consequência a eficiência da caldeira aumenta em torno de 1%. Por meio de um cálculo técnico econômico é encontrado o valor ótimo da t_g , e para diminuir esse valor pode se realizar algumas alterações na caldeira, como por exemplo, o aumento da área de transferência de calor nos economizadores e preaquecedores e o aumento na resistência aerodinâmica interna da caldeira que provoca diminuição no consumo de energia elétrica pelos ventiladores. Nas caldeiras modernas o valor dessa perda está em torno de 15%, (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008). O cálculo dessa perda é efetuado por intermédio da equação 22.

$$q_2 = \frac{h_{ge} - \alpha_g \cdot h_{af}^o}{Q_d^t} \cdot (100 - q_4), \% \quad (22)$$

Onde:

h_{ge} – é a entalpia dos gases de escape determinada a partir do coeficiente de excesso de ar e sua temperatura, kJ/kg;

h_{af}^o – é a entalpia do ar a temperatura ambiente, kJ/kg;

α_{ge} – é coeficiente de excesso de ar.

4.4.2 Perda por combustão química incompleta (q_3)

Essa perda tem como resultado da combustão incompleta do bagaço o aparecimento de produtos oriundos da combustão como CO, H₂ e CH₄. O valor de q_3 é determinado pela equação 23.

$$q_3 = \frac{\sum (V_i \cdot PCI_i)}{Q_d^t} \cdot (100 - q_4), \% \quad (23)$$

Onde:

V_i – é o volume de produtos da combustão incompleta ($V_i = x_i \cdot V_{gs}$), (V_{CO} , V_{H_2} , V_{CH_4}), m³/kg.

x_i é a fração volumétrica dos produtos da combustão incompleta;

PCI_i – é o poder calorífico inferior dos produtos da combustão incompleta, kJ/kg.

Desenvolvendo a equação 23 pela substituição dos valores de x_i e PCI_i resulta na equação 24.

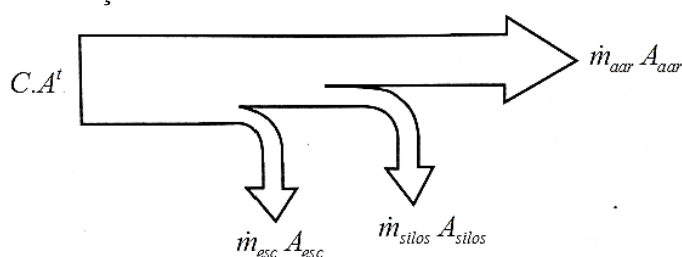
$$q_3 = (126,4CO + 358,2CH_4 + 108H_2) \cdot \frac{V_{gs}}{Q_d^t}, \% \quad (24)$$

Nas caldeiras a bagaço mais atuais as perdas q_3 se estabelece em torno de 0,5%, (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

4.4.3 Perda por combustão mecânica incompleta (q_4)

Determinada a partir do balanço térmico das cinzas essa perda se refere às partículas de combustível não queimado que saem misturados com as cinzas ou são carregadas pelos gases de exaustão (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008). A figura 26 mostra o balanço de cinzas na caldeira de bagaço.

Figura 26: Balanço de cinzas na caldeira.



Fonte: CORTEZ; LORA; GÓMES, (2008).

O balanço de cinza é determinado pela equação 25.

$$C.A^t = \dot{m}_g . A_g + \dot{m}_{silos} . A_{silos} + \dot{m}_{arr} . A_{arr} \quad (25)$$

Onde:

A_g, A_{silos}, A_{arr} – é o conteúdo de cinza retirado na grelha, dos silos de cinzas e no arraste;

$\dot{m}_g, \dot{m}_{silos}, \dot{m}_{arr}$ – é o fluxo de resíduos retirados na grelha, dos silos de cinzas e no arraste;

Dividindo a equação 25 por $C.A^t$ resulta na equação 26.

$$1 = \frac{\dot{m}_g . A_g}{C.A^t} + \frac{\dot{m}_{silos} . A_{silos}}{C.A^t} + \frac{\dot{m}_{arr} . A_{arr}}{C.A^t}$$

$$1 = a_g + a_{silos} + a_{arr} \quad (26)$$

Onde:

a_g, a_{silos}, a_{arr} – é a fração do conteúdo total de cinzas do combustível extraídos da grelha, dos silos de cinzas e no arraste, %.

A expressão 26 possibilita determinar o valor do a_{arr} tendo como base valores experimentais para a_g , a_{silos} . Sabendo se que o poder calorífico inferior do carbono fixo (coque) vale $Q_C = 32,78$ MJ/kg a perda por combustão mecânica é determinada pela equação 27. Caldeiras atuais esse valor varia de 1 a 4% (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

$$q_4 = \left(a_g \cdot \frac{C_g}{100 - C_g} + a_{silos} \cdot \frac{C_{silos}}{100 - C_{silos}} + a_{arr} \cdot \frac{C_{arr}}{100 - C_{arr}} \right) \cdot \frac{327,8A^t}{Q_d^t} \quad (27)$$

Onde:

C_g , C_{silos} , C_{arr} – é o conteúdo de elementos combustíveis nos resíduos extraídos na grelha, dos silos de cinza e no arraste, %.

4.4.4 Perda de calor para o ambiente (q_5)

As perdas de calor para o ambiente deveriam ser executadas por meio do equacionamento de todas as trocas de calor por convecção e por radiação desde as paredes da caldeira até o ambiente externo. Essa perda pode ser determinada pela equação 28.

$$C \cdot Q_5 = \sum F_i \cdot \alpha_{convi} \cdot (t_{pi} - t_{af}) \quad (28)$$

Onde:

α_{convi} – é o coeficiente de transferência de calor por convecção;

t_{pi} – é a temperatura exterior da caldeira;

F_i – é a área da superfície da parede exterior da caldeira.

Essa determinação na prática é irreal, o valor de q_5 pode ser determinado por nomogramas com auxílio da equação 29 e da figura 27.

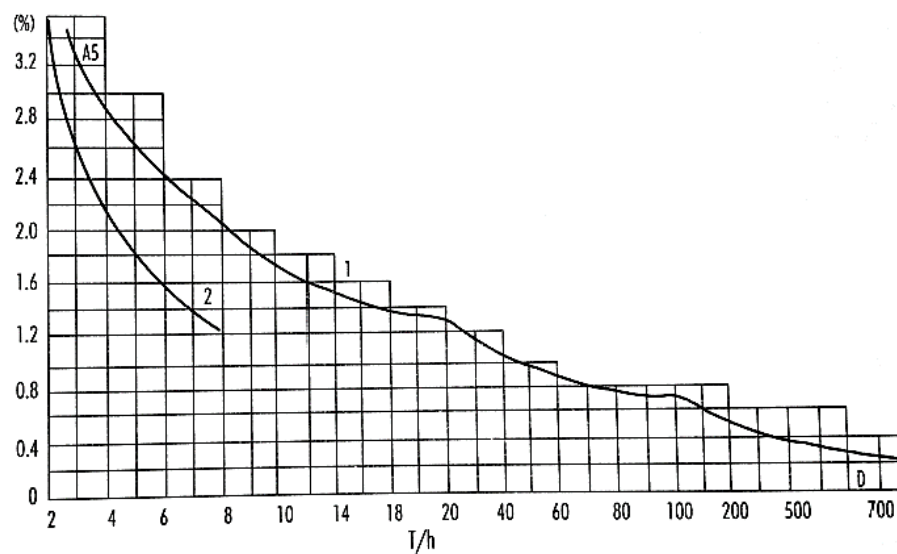
$$q_5 = q_{5nom} \cdot \frac{\dot{m}_{vsnom}}{\dot{m}_{vs}} \alpha_{convi} \quad (29)$$

Onde:

q_{5nom} – é a perda de calor para o ambiente para uma determinada produção de vapor, %;

\dot{m}_{vsnom} – é a produção nominal de vapor, ton/h.

Figura 27: Nomograma de perdas de calor para o meio ambiente.



1. Caldeiras com superfícies convectivas; e 2. Caldeiras sem superfícies convectivas.

Fonte: CORTEZ; LORA; GÓMES, (2008).

Outra maneira de determinar essa perda é com a utilização da carta de perda de energia por radiação ABMA (ASME PTC 4.1, 1964) mostrada na figura 28. Ela tem como base o PCI e PCS. A perda de energia está relacionada com a energia recebida pela caldeira (ARNAO, 2007).

Figura 28: Carta de perda de energia por radiação ABMA (ASME PTC 4.1, 1964), base PCI e PCS.

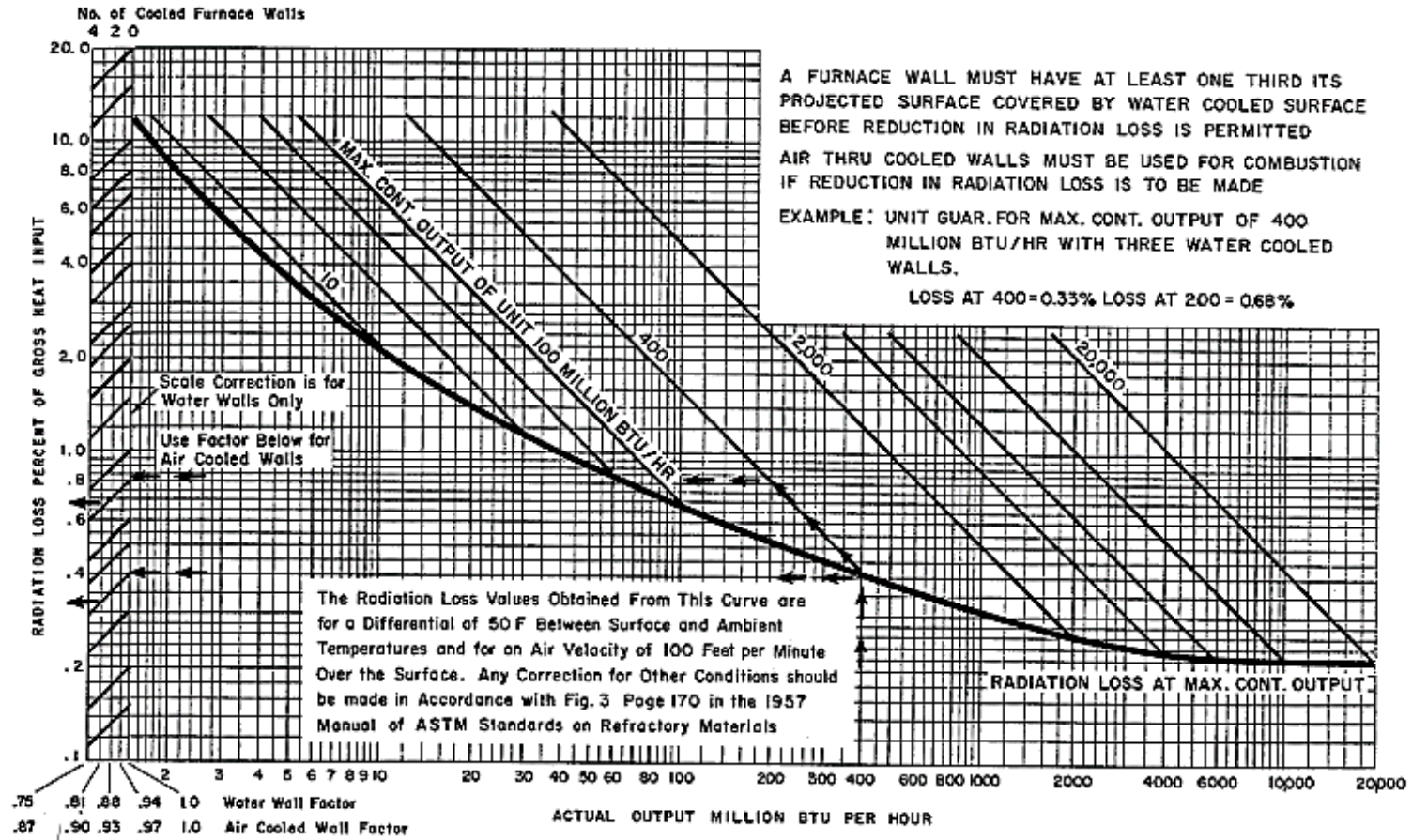


FIG. 8 ABMA STANDARD RADIATION LOSS CHART

To facilitate the use of the major correction which is for air velocity, this correction is included in the Code on Fig. 9, the lower curve of which is the basis of the ABMA curve.

(Published through the courtesy of the American Boiler Manufacturers Association.)

Fonte: ABMA (ASME PTC 4.1, 1964).

4.4.5 Perda de calor das escórias e das cinzas (q_6)

Essa perda acontece em função das escórias e as cinzas que são extraídas da fornalha com temperatura superior a temperatura do meio ambiente. Nas caldeiras atuais esse valor é menor que 0,1%, o que justifica desprezar essa perda na maioria dos casos (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008). Essa perda pode ser determinada com a utilização da equação 30.

$$q_6 = A^t \cdot a_{esc} \cdot C_{esc}^* \cdot \frac{t_{esc}}{Q_d^t} \quad (30)$$

Onde:

C_{esc}^* , t_{esc} – é o calor específico e temperatura da escória.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio do volume de controle apresentado na figura 24 e do valor total transferido pelo combustível na caldeira em estudo foi possível determinar o consumo de bagaço de cana-de-açúcar na caldeira. Os valores encontrados para as cultivares estudadas estão descritos na tabela 6 e foram determinados através da relação entre o calor total transferido pelo combustível (991.858,2 MJ/h) e o poder calorífico inferior do bagaço de cada variedade estudada.

Tabela 6: Resultados do consumo de bagaço da cana-de-açúcar.

| Cultivares | PCI - Poder calorífico inferior (Mcal/t) | Umidade % | Consumo de bagaço (kg/s) |
|-------------------|---|------------------|---------------------------------|
| SP 80-1816 | 4247,90 | 69,04 | 15,52 |
| RB72-454 | 4176,79 | 70,57 | 15,78 |
| SP80-3280 | 4092,17 | 69,60 | 16,11 |
| SP81-3250 | 3996,97 | 69,13 | 16,49 |

Fonte: Autor.

Apesar de não haver diferença significativa na umidade do bagaço de cana-de-açúcar das cultivares utilizadas nesse estudo, as variedades SP80-3280 e SP81-3250 foram as que resultaram em um consumo maior de bagaço na caldeira para suprir as especificações técnicas. O consumo bagaço da cana-de-açúcar se estabeleceu em torno de 6,3%, maior do que a variedade SP 80-1816. Efetuando um comparativo no consumo de bagaço em t/h dessa variedade com variedade SP81-3250 resulta em 3,492 t/h de bagaço consumido a mais do que a primeira cultivar. Para a determinação da eficiência pelo método direto foi necessário determinar as energias fornecidas e útil do bagaço da cana-de-açúcar de cada cultivar. Esse cálculo foi feito encontrando os valores descritos na tabela 7.

Tabela 7: Resultados da energia fornecida e útil por meio da queima do bagaço da cana-de-açúcar.

| Cultivares | Energia fornecida (kJ/kg) | Energia útil (kJ/kg) |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| SP 80-1816 | 19.272,00 | 15.893,21 |
| RB72-454 | 18.973,72 | 15.627,16 |
| SP80-3280 | 18.621,05 | 15.310,56 |
| SP81-3250 | 18.127,72 | 14.954,37 |

Fonte: Autor.

A média na diferença da energia útil fornecida na queima do bagaço da cana-de-açúcar das cultivares SP 80-1816 e SP81-3250 ficaram em torno de 6%, justificando o consumo maior de bagaço da última cultivar para oferecer a mesma quantidade de energia da primeira cultivar conforme foi mostrado na tabela 6. Após a determinação dos valores descritos nas tabelas 6 e 7 foi

possível determinar o rendimento da caldeira que serviu de modelo para estudo. Ele foi determinado pelo método direto utilizando três parâmetros: Energia útil pela Energia fornecida; Base poder calorífico superior PCS; Base poder calorífico inferior PCI. Os resultados estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Resultados da eficiência da caldeira utilizada para estudo.

| Cultivares | Eficiência PCI (%) | Eficiência PCS (%) | Energia útil/fornecida (%) |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| SP 80-1816 | 91,37 | 82,97 | 82,47 |
| RB72-454 | 92,93 | 82,87 | 82,36 |
| SP80-3280 | 94,85 | 82,74 | 82,22 |
| SP81-3250 | 97,11 | 82,59 | 82,49 |

Fonte: Autor.

A partir dos resultados encontrados que estão dispostos na tabela 8 verifica-se que a eficiência da caldeira pelo método PCI é maior porque esse parâmetro é menor do que o PCS. Como na equação do cálculo da eficiência os parâmetros mencionados é inversamente proporcional ao poder calorífico justifica-se esse resultado ser maior do que os outros métodos. Já os demais métodos eficiência PCS e energia útil pela energia fornecida não apresenta diferença considerável nos resultados. Se for realizada uma comparação entre as eficiências encontradas e apresentadas na tabela 8, pode-se verificar o seguinte: a eficiência dos métodos PCS e Energia útil/fornecida são menores do que o método PCI porque o parâmetro base PCS é maior do que o PCI devido a presença de umidade. Apesar da diferença entre os parâmetros apresentados nas tabelas 6 e 7, o rendimento da caldeira entre as cultivares utilizadas não apresentou diferença significativa devido às condições de alimentação e operação da caldeira.

Tabela 9: Valores de referência para o cálculo da energia fornecida.

| Variável | Valor / unidade |
|---|--|
| Calor específico médio do combustível c_{pc} | 3,02 kJ/kg.°C |
| Temperatura do combustível T_C | 30 °C |
| Temperatura de referência T_R | 25 °C |
| Massa ar seco $m_{ar\ seco}$ | 4,79 kg/kg _{comb} |
| Calor específico da água c_{pa} | 4,19 kJ/kg°C |
| Umidade do ar ambiente W | 0,019 kg _{água} /kg _{arse} |
| Calor específico médio do vapor d'água c_{pv} | 1,9 kJ/kg°C |
| Temperatura do ar de combustão T_{ar} | 30 °C |

Fonte: Autor.

Para atender aspectos normativos para cálculo de balanço térmico de caldeira, o cálculo da eficiência da caldeira para os quatro cultivares empregados foi elaborado com

base no manual de recomendações publicado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) CAMARGO (1990). O qual recomenda que parâmetros como o PCI e PCs sejam utilizados para quantificar a eficiência térmica da caldeira a fim de os resultados finais calculados por métodos diferentes sejam interpretados e comparados com os requisitos da caldeira. Além dos valores do PCI e PCS, outros valores utilizados nos cálculos da eficiência foram os dados da caldeira que serviu de modelo para o trabalho, são eles: temperatura do vapor 520 °C, gases de combustão 160 °C, pressão de trabalho 6,7 MPa e vazão de vapor produzido na caldeira 991.858,2 MJ/h.

Outro parâmetro muito importante nos cálculos foi a determinação das energias fornecidas e útil do bagaço da cana-de-açúcar de cada cultivar. Para calcular a energia fornecida pelo bagaço da cana-de-açúcar foi necessário levar em consideração os dados da tabela 9 juntamente com a equação 7. Os dados da tabela 9 são valores de referência que são comumente utilizados em cálculos do rendimento térmico de caldeiras como por exemplo: massa de ar seco que irá entrar na câmara de combustão, calor específico médio do combustível.

6 CONCLUSÃO

Um dos valores necessários para a determinação da eficiência térmica da caldeira é a quantidade de bagaço de cana-de-açúcar que deve ser introduzido na câmara de combustão da caldeira. Esse valor foi determinado pela relação entre a vazão de vapor produzido na caldeira pelo PCI de cada cultivar, e por meio desse cálculo a menor vazão de alimentação de bagaço na caldeira foi da cultivar SP 80-1816 com uma taxa de 15,52 kg/s ao passo que na cultivar SP81-3250 foi encontrado a maior taxa de alimentação 16,49 kg/s. Esse valor mostra que para manter as condições de trabalho a câmara de combustão da caldeira tem que ser suprida com maior quantidade de bagaço da segunda cultivar, ou seja, 3,492 t/h. Quanto maior a quantidade de bagaço de alimentação maior é o trabalho com maquinário e mais gastos com logística a unidade produtora de vapor ocorrem. Sendo assim, a utilização da variedade SP 80-1816 para a queima mostrou ser mais vantajosa. As outras duas cultivares analisadas RB72-454 e SP80-3280 ficaram em posição intermediária entre duas variedades citadas.

Dos valores encontrados, o destaque ficou novamente com as cultivares SP 80-1816 com uma energia fornecida de 19.272,00 kJ/kg e a cultivar SP81-3250 18.127,72 kJ/kg, esse resultado mostrou uma diferença de 1.144,28 kJ/kg, quantificando esse valor em tonelada resulta em 1.144,28 MJ/ton de energia. O cálculo da energia útil resulta em um valor mais baixo porque leva em consideração os valores efetivos que a caldeira vai utilizar na geração da energia térmica, são eles: fluxo de vapor da caldeira, entalpia da água na entrada da caldeira, entalpia do vapor na saída da caldeira e o consumo de bagaço na câmara de combustão. Nesse cálculo os resultados encontrados foram: cultivar SP 80-1816 com uma energia útil de 15.893,21 kJ/kg e a cultivar SP81-3250 14.954,37 kJ/kg, mais uma vez esse resultado mostra que para a caldeira em questão a cultivar SP 80-1816 é a melhor opção para a produção de energia térmica porque a diferença energética entre as duas cultivares é de 938,84 MJ/ton.

Por fim, os métodos utilizados para determinar a eficiência térmica da caldeira apresentou resultados semelhantes entre as cultivares analisadas. O método calculado levando em conta o PCI apresentou eficiência térmica da caldeira acima de 90%, com a utilização da cultivar SP81-3250 o valor foi de 97,11%. Esse valor justifica-se por ter sido utilizado o método direto no cálculo, não levando em conta os valores das perdas que acontecem no sistema. Os valores encontrados empregando dos métodos PCS e Energia útil

/ Energia fornecida foram mais baixos ficando próximos porque nesses métodos os valores utilizados nos cálculos levam em consideração os requisitos reais do funcionamento da caldeira, ou seja, as especificações técnicas da caldeira. Sendo assim, por meio desse estudo foi demonstrado a importância da determinação da eficiência térmica de uma caldeira ao da queimar do bagaço da cana-de-açúcar para diferentes cultivares de cana. O resultado permite a utilização das melhores variedades para suprir os requisitos dos equipamentos que utilizam essa matéria-prima como fonte energética. Das cultivares analisadas a melhor escolha para utilização do bagaço da cana-de-açúcar como fonte primária de energia é a cultivar SP 80-1816 por apresentar menor consumo de bagaço na caldeira, estabelecido no patamar de 15,52 kg/s e maior energia útil disponível designado no valor de 15.893,21 kJ/kg para geração de vapor.

Como sugestão para trabalhos futuros, indicamos determinar a eficiência de cada cultivar considerando as perdas que acontecem no processo de produção de vapor em diferentes caldeiras. Isso pode possibilitar a identificação de qual será a eficiência fornecida pelas cultivares em equipamentos diferentes, considerando o ponto de trabalho de cada um, ou seja, qual será a melhor cultivar a ser utilizada em uma unidade industrial. Alegamos que outro item também como tópico importante para ser desenvolvido em trabalhos futuros é o cálculo da energia térmica que o vapor fornecerá para uma turbina a vapor com a finalidade de produção de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, J. The boiler efficiency fueled bagasse. **International Sugar Journal**. v. 97, no.1158, pp.248- 255, 1995.
- AIDUN, A. R. **Free settling of fibres in fluids**, Ph.D Thesis, Faculty of Chemical Engineering, Syracuse University, New York, 1956.
- ALARCÓN, G. A. R., Jústiz, M. A. B. **Industrial device for drying and classifying sugar cane bagasse**, International Sugar Journal, v.95, n.1133, pp. 319-322, 1993.
- ARALDE, L. E., Tosi, E., Tapiz, L., Paz, D., Cárdenaz, G. J. **Determinação da velocidade de transporte pneumático do bagaço de cana de açúcar**, Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, v. 69, pp. 15-22, 1991.
- ANEEL. Biomassa. In: ANEEL. **Biomassa**. [S. l.: s. n.], [entre 2004 e 2010]. Disponível em:< [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acesso em: 8 ago. 2019.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de energia elétrica**. [S. l.], 1.tri. 2019. Disponível em:<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>> Acesso em: 13 ago. 2019.
- ANTUNES, João Francisco Gonçalves; AZANIA, Carlos Alberto Mathias; AZANIA, Andréa A. Padua Mathias. **Impactos ambientais das queimadas de cana-de-açúcar**. Revista Cultivar, [S. l.], 1.tri. 2019.
- ARNAO, Juan Harold Sosa. **Caldeiras Aquatubulares de Bagaço – Estudo do Sistema de Recuperação de Energia**. Orientador: Prof. Dra. Silvia Azucena Nebra de Pérez. 2007. 257 f. Tese (Doutorado) - COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE ENERGIA, Campinas, 2007. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/265071/1/SosaArnao_JuanHarold_D.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2019.
- Aspectos econômicos e institucionais da rotação da cana-de-açúcar com espécies vegetais**. 2019. Figura. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Principais-produtos-da-cana-de-acucar_fig3_287198540. Acesso em: 8 ago. 2019.
- BAILLIET, V. J. **Bagasse drying versus air pre-heating**, The Sugar Journal, v.38, n10, pp. 52-53, 1976.
- BALOH, T., Wittwer, E. Energy Manual for Sugar Factories, 2da edition, Verlag Dr. Albert Bartens, 1995.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2019. Rio de Janeiro: **Empresa de Pesquisa Energética, 2019**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Acesso em: 23 jul. 2019.
- BIOAGÊNCIA. **Emissão de gases da queima da cana paulista diminuiu 44% em 25 anos**. Agência de fomento de energia de biomassa, [S. l.], p. 1, 31 maio 2017.

Disponível em: <<http://www.bioagencia.com.br/noticias/8201/emissao-de-gases-da-queima-da-cana-paulista-diminuiu-44-em-25-anos.html>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Operação de caldeiras - Gerenciamento, controle e manutenção**. São Paulo: Blucher, 2011.

CAMARGO, Carlos Augusto de (coord.). **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool**: Manual de recomendações. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. 796 p.

CASTRO, Bárbara Alves Araújo de. Análise do setor sucroenergético do Triângulo Mineiro. **Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de Minas Gerais**, Belo Horizonte, p. 1-64, 2018.

Climate Change. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Tradução: **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as alterações climáticas**. Brasília: [s. n.], 2016. 336 p. v. 3. ISBN 978-85-88063-25-9.

CONTRERAS, A.M.; ROSA, E.; PÉREZ, M.; LANGENHOVE, H.V.; DEWULF, J. **Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production**. Journal of Cleaner Production, Amsterdam, v. 17, p. 772-779, 2009.

CORTEZ, Luis Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMES, Edgardo Olivares. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008.

DEKKER, Marcel (ed.). **Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators**. UNITED STATES OF AMERICA: Marcel Dekker, Inc, 2003. 618 p. ISBN 0-8247-0814-8.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mato Grosso do Sul tem amplo potencial para transformação de biomassa em energia**. [S. l.], 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/35222348/mato-grosso-do-sul-tem-amplo-potencial-para-transformacao-de-biomassa-em-energia>>. Acesso em: 25 jul. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Projeção da demanda de energia elétrica**. Estudos da demanda, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF\[1\].pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf)>. Acesso em: 7 ago. 2019.

GONZÁLEZ, MSc. Felipe Orlando Centeno. **Avaliação da combustão de bagaço e palha de cana-de-açúcar numa fornalha de caldeira industrial AMD a partir da modelagem por CFD**. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Itajubá - Instituto de Engenharia Mecânica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Itajubá, 2015.

HASSUANI, S. J.; VERDE LEAL, M. R. L.; DE CARVALHO MACEDO, I. **Biomass power generation**. Sugar cane bagasse and trash. Piracicaba, PS, Brasil: PNUD, CTC 2005

HUGOT, E. **Handbook of Cane Sugar Engineering**. 3rd .ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1986. 1186p.

IBGE. **A geografia da cana-de-açúcar**. Dinâmica territorial da produção agropecuária, [S. l.], p. 15-31, 10 abr. 2018. Disponível em:<
https://www.ibge.gov.br/apps/dinamica_agropecuaria/>. Acesso em: 15 ago. 2019.

INNOCENTE, A.F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar - Estudo de caso**. 2011. 124p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) -Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Atlas de biomassa**. São Paulo, 2012. Disponível em:
<<http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/atlas-de-biomassa>>. Acesso em: 6 ago. 2019.

JENKINS, B.M.; BAXTER; L.L., MILES Jr., T.R.; MILES, T.R. **Combustion properties of biomass**. Fuel Processing Technology, Amsterdam, v. 54, p. 17-46, 1998.

JENKINS, B.M.; EBELING, J.M. **Thermochemical properties of biomass fuels: an analysis of 62 kinds of biomass for heat value**. California Agriculture, June 1985. p. 14-16.

LIMA, Adriano Dawson de. **Otimização do aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar**. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009. Disponível em:<
<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/90515?show=full>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

LOPES SILVA, D.A.; DELAI, I.; DELGADO MONTES, M.L., OMETTO, A.R. **Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdam, v.32, p. 532-547, 2014.

LORA, Electo Eduardo silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. **Geração Termelétrica - Planejamento, Projeto e Operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MEIRELLES, A. J. A., Secagem de bagaço de cana em Leito fluidizado in a fluidized bed. Universidade Estadual de Campinas, 1984, Dissertação (Mestrado).

MINISTRY OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION (Brasília). Secretariat of Policies and Programs of Research and Development. General Coordination of Global Climate Change. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Tradução: **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as alterações climáticas**. Brasília: [s. n.], 2016. 336 p. v. 3. ISBN 978-85-88063-25-9. Disponível em:<
<https://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3v3.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

OMETTO, A.R.; HAUSCHILD, M.Z.; ROMA, W.N. **Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil**. International Journal of Life Cycle Assessment, Berlin, v. 14, p. 236-247, 2009.

SAMPAIO, Raquel Paschoal. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado do resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço da cana**. Orientador: Prof. Dr.

Josmar Davilson Pagliuso. 2014. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2015.

SANTINI, João Bosco; TELHADO, Daniel..In: SANTINI, João Bosco; TELHADO, Daniel. **Projeto mecânico-estrutural de Caldeiras de vapor**. [S. l.]: Petroblog, 6 nov. 2015.

SOARES, Paulo Augusto; ROSSELL, Carlos Eduardo Vaz. **O setor sucroalcooleiro e o domínio tecnológico**. São Paulo: Naippe/USP, [2006?].

TGM WEG Energia, **Estudo de viabilidade para pequenas Centrais Termelétricas**. [S. l.], 21 jan. 2019.

UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA. **A História da Cana-de-açúcar - Da Antiguidade aos Dias Atuais**. [S. l.], [201-]. Disponível em:<<https://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>. Acesso em: 6 ago>. 2019.

VAN der Poel, P. W., Schiweck, H., Schwartz, T. **Sugar Technology Beet and Cane Sugar Manufacture**. Berlin, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Germany, 1998, 1118p.