

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO
DE VAPOR**

YURI DINIZ DA SILVA BRANDÃO

Uberlândia - MG

2022

YURI DINIZ DA SILVA BRANDÃO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO
DE VAPOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado Na
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como
requisito para a obtenção do Diploma de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes
Antunes

Uberlândia - MG

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B817 Brandão, Yuri Diniz da Silva, 1987-
2022 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO DE
GERAÇÃO DE VAPOR [recurso eletrônico] / Yuri Diniz da
Silva Brandão. - 2022.

Orientador: Arthur Heleno Pontes Antunes.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Antunes, Arthur Heleno
Pontes, 1985-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

YURI DINIZ DA SILVA BRANDÃO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO
DE VAPOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado Na
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como
requisito para a obtenção do Diploma de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes
Antunes

Uberlândia, agosto de 2022

Banca Examinadora:

Nome – Titulação (sigla da instituição)

Nome – Titulação (sigla da instituição)

Nome – Titulação (sigla da instituição)

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais Aroldo Diniz Brandão e Áurea Helena da Silva Brandão por estarem sempre ao meu lado, apoiando e incentivando em todos momentos da minha vida, a minha esposa Paula Letícia Costa Melo pelo companheirismo e suporte durante essa jornada e ao amigo e professor Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes pela orientação e amizade.

RESUMO

As usinas sucroalcooleiras representam importante papel no agronegócio brasileiro com a produção de açúcar, biocombustível, energia e outros derivados da colheita da cana-de-açúcar. Esse trabalho tem como objetivo medir a eficiência de uma caldeira instalada em uma usina de cana fictícia usando o método indireto para este fim.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Usina sucroalcooleira. Geração de Vapor. Caldeira. Combustão. Método Indireto.

ABSTRACT

Sugarcane mills have an important role in Brazilian agribusiness with the production of sugar, biofuel, energy and other derivatives of the sugarcane harvest. This work aims to measure a boiler's efficiency installed in a fictitious sugarcane mill using the indirect method for this purpose.

Keywords: Sugar cane. Sulcroalcohol plant. Steam Generation. Boiler. Combustion. Indirect Method.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 USINAS SUCROALCOOLEIRAS	12
2.1.1 Produção de Vapor	15
2.1.2 Açúcar.....	16
2.1.3 Etanol.....	16
2.1.4 Bagaço da cana-de-açúcar como combustível.....	16
2.1.5 Cogeração	17
2.2 CALDEIRA AQUOTUBULAR	17
2.3 COMBUSTÃO DA BIOMASSA	19
2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS CALDEIRAS.....	21
2.4.1 MÉTODO DIRETO.....	22
2.4.2 MÉTODO INDIRETO	23
3 DESENVOLVIMENTO.....	24
3.1 Perdas por combustão incompleta	25
3.2 Perdas por combustível não queimado	26
3.3 Perdas por convecção e radiação (calor ao ambiente)	26
3.4 Perdas associadas por cinzas	27
3.5 Perdas por entalpia dos produtos da combustão	27
3.6 Perdas por umidade no combustível.....	28
4 RESULTADOS	29
5 CONCLUSÃO.....	30
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO	32

1 INTRODUÇÃO

O uso do vapor na indústria surgiu com a Revolução industrial e é atualmente largamente utilizado. Com o aprimoramento das máquinas térmicas, a utilização do vapor está presente em grande quantidade nas indústrias, fábricas e processos da atualidade. Seu insumo principal é a água e, por isso, é uma energia de fácil aquisição e que pouco prejudica o meio ambiente.

A primeira máquina que utiliza vapor foi patenteada por Thomas Savery em 1698. As caldeiras, também chamadas de gerador de vapor, são responsáveis por produzir o vapor a partir da água para diversos fins industriais, como para transformar a energia armazenada em energia mecânica a ser utilizada por máquinas térmicas chamadas de turbinas. Estas, tem a função de acionar geradores de energia elétrica, suprimindo a necessidade de instalações e abastecendo concessionárias de energia elétrica. Essa atividade é chamada de cogeração e é muito comum encontra-la em usinas sucroalcooleiras.

Dada tamanha utilidade e importância da geração de vapor, esse trabalho tem como objetivo calcular a eficiência energética de uma caldeira instalada em uma usina fictícia de cana-de-açúcar por meio do método indireto, também chamado de método das perdas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a realização desse trabalho foi feito um estudo prévio das disciplinas de Termodinâmica, Geração e Distribuição de Vapor e Máquinas Térmicas, bem como estudo acerca dos geradores de vapor. A história e importância das usinas de cana-de-açúcar e seus equipamentos também foram investigados para uma melhor contextualização da importância de se aferir a eficiência de uma caldeira.

2.1 USINAS SUCROALCOOLEIRAS

O Brasil possui um histórico no uso da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de energia, açúcar e etanol. O país é referência quando o assunto é o processo produtivo de usinas sucroalcooleiras, sendo sua utilização relativamente simples, porém com etapas críticas durante o processo.

A cana-de-açúcar, provavelmente proveniente da Índia, chegou ao Brasil no século XVI trazida pelos portugueses para a sua então colônia agrícola, com fatores especialmente favoráveis para o seu desenvolvimento: solos férteis, abundância em água, temperaturas elevadas, relevo plano. Sua criação nos engenhos começou nas porções litorâneas da costa brasileira, expandindo, com o tempo, para o interior. Com mão de obra escrava (africana e indígena), a cana era cultivada, cortada e levada ao engenho onde seria moída, seu caldo aferventado para formar a garapa para então ser cristalizada e dar origem aos torrões de açúcar para exportação para a Europa.

Em meados da década de 1970, deu origem ao Programa Nacional do Alcool – Proálcool: uma nova política para o álcool que juntou empresários de usinas e de destilarias, o Estado, o setor de máquinas e equipamentos do setor canavieiro e a indústria automobilística. Visava-se a produção do etanol combustível como alternativa energética e solução para o uso de derivados do petróleo, adicionando o produto à gasolina.

Com as contínuas crises do petróleo na década de 70, o Brasil buscou na cana-de-açúcar uma saída para a crise. Assim, o álcool adquiriu importância estratégica na economia nacional e foi desenvolvido o primeiro automóvel nacional com motor movido a etanol – o Fiat 147.

No século XXI, novas tecnologias e novos procedimentos foram sendo embutidos para o alcance de uma maior produtividade e de um menor custo de produção dos dois produtos tradicionais — açúcar e álcool —, mas também para o aproveitamento de resíduos que, aos poucos, iam se transformando em novos subprodutos da cadeia produtiva canavieira, como a vinhaça, a torta de filtro e o bagaço de cana-de-açúcar.

Este último item passou a ser muito utilizado a partir dos anos 2000 para produção de energia térmica e elétrica. Os principais fatores que desencadearam o interesse do setor sucroalcooleiro nesse ramo foram a reestruturação do setor elétrico brasileiro, o novo marco regulatório, principalmente a partir de 2004, que possibilitou a realização de contratos de longo prazo para a venda de energia elétrica, as novas unidades *greenfield*, que já incorporaram nos projetos e planos de negócios das usinas a geração de energia elétrica e a maior escala de produção, possibilitando melhores contratos para a comercialização de energia. Dessa forma, a maior parte das usinas e destilarias atualmente apresenta em sua planta industrial uma central termelétrica cogeneradora.

Em geral, o bagaço de cana-de-açúcar é constituído de 46 a 52% de umidade, 43 a 52% de fibras, partículas de terra, e resíduos de caldo com 2 a 6% de sólidos solúveis. Por haver uma grande quantidade de biomassa disponível nas usinas e na plantação canavieira, outros usos

foram sendo pesquisados para sua aplicação, dentre eles a produção de etanol a partir de tecnologias denominadas de segunda geração. O etanol de segunda geração pode ser produzido a partir da biomassa do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, ou de qualquer outra biocelulose, diferentemente do etanol de primeira geração, que tem como matéria-prima o caldo da cana-de-açúcar. Assim, em setembro de 2014, entrou em operação a primeira usina, no Brasil, de etanol de segunda geração.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Segundo dados do IBGE Na safra de 2020, a área colhida foi superior a 10 milhões de hectares, utilizada predominantemente para a produção de açúcar e etanol. Nessa safra, foram colhidos aproximadamente 757 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em cerca de 172 mil unidades pelo país, com o estado de São Paulo sendo o maior produtor.

Valor da produção	60.800.886 Mil Reais (2020)	Estabelecimentos	171.348 Unidades (2017)
Quantidade produzida	757.116.855 Toneladas (2020)	Rendimento médio	75.604 Kg por Hectare (2020)
Área colhida	10.014.198 Hectares (2020)	Maior produtor	São Paulo (2020)

Mapa - Cana-de-açúcar - Valor da produção (Mil Reais)

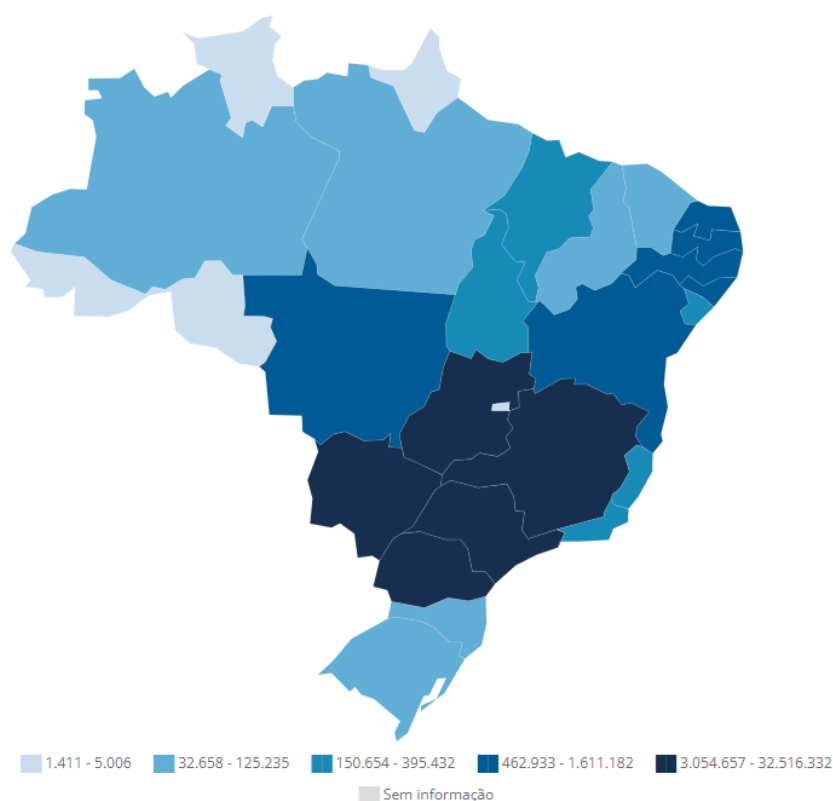


Figura 1 - Mapa da cana-de-açúcar em valor da produção por região no Brasil

2.1.1 Produção de Vapor

Para a geração de vapor é composto um sistema de tratamento de água que alimenta a caldeira (tanque de condensado, desaerador, bombas de água), equipamentos da linha de combustível (tanques de armazenamento, cavaletes de redução de pressão, válvulas e atuadores), caldeiras e outros componentes e equipamentos, dependendo da aplicação e necessidade de vapor.

A Norma Regulamentadora 13 (NR13, 1978) define caldeiras como sendo equipamentos que produzem e acumulam vapor com pressão acima da atmosférica, conceito complementado por Çengel (2013) afirmando que “caldeira é basicamente um grande trocador de calor no qual o calor originário de gases da combustão, reatores nucleares ou outras fontes é transferido para água”. Esse vapor produzido por caldeiras pode ser utilizado para secagem, cozimento, lavagem de utensílios, geração de energia, aquecimento ambiental, desinfecção, pasteurização dentre outras aplicações industriais.

Ainda, a NR13 classifica as caldeiras em duas classes, A e B, na qual as de categoria A são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm²), com volume superior a 100 L (cem litros) e as caldeiras da categoria B são aquelas cuja a pressão de operação seja superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm²) e inferior a 1 960 kPa (19,98 kgf/cm²), volume interno superior a 100 L (cem litros) e o produto entre a pressão de operação em kPa e o volume interno em m³ seja superior a 6 (seis).

Por outro lado, Pera (1990) classifica as caldeiras em dois tipos: fogotubular (também chamadas de flamotubulares) e aquotubular. Nesta, a água passa dentro dos vasos e o calor por fora; naquela, ocorre o oposto, a água é externa aos vasos e calor dentro dos tubos. Neste trabalho as caldeiras usadas como referência são aquotubulares, pois são as que suportam maior produção de vapor, característica essencial para as usinas sucroalcooleira com cogeração.

O vapor desempenha um papel fundamental em uma indústria sucroalcooleira, sem o qual não seria possível a produção do açúcar. As caldeiras de geração de vapor são utilizadas para cozimento, acionamento das turbinas, bem como assegurar a evaporação e a condensação.

O vapor produzido na caldeira é então gerado pela transformação de energia química do combustível em calor. A energia introduzida na instalação em massa, ou volume de

combustível, ou seja, essa energia química é denominada de energia disponível. A quantidade de energia absorvida pelo fluido de trabalho, ou seja, o vapor pode ser utilizado além da geração de energia térmica, para a geração de energia elétrica. Essa energia é denominada de energia útil. A diferença entre a energia disponível e a energia útil, ou de fato utilizada, é devido às perdas que ocorrem durante o processo, inevitáveis e nos vários pontos da instalação. Essa energia é denominada de energia de perdas.

Vários são os tipos de combustíveis utilizados para gerar calor em caldeiras. Eles podem ser do tipo natural como carvão mineral ou biomassa (bagaço de cana-de-açúcar, madeira, eucalipto, casca de arroz, casca de coco verde) ou derivados como é o caso do gás natural e óleo, que são os combustíveis mais utilizados para a queima em processos industriais.

2.1.2 Açúcar

Da extração do caldo da cana da cana e posterior tratamento para secagem da água é gerado o açúcar, o qual pode passar por diferentes tipos de tratamentos e atingir os estados de açúcar mascavo, cristal, refinado, demerara e outros.

2.1.3 Etanol

O etanol ou álcool etílico (C_2H_5OH) pode ser extraído pelo processo de fermentação a partir de diversas matérias-primas como milho, mandioca, cereais, beterraba e a cana-de-açúcar.

O etanol se divide em dois tipos, etanol anidro e hidratado que se diferenciam pela quantidade de água presente em cada um. Contudo, até a etapa de fermentação, na qual o etanol hidratado é formado, o processamento é igual, porém, a formação de etanol anidro necessita ainda passar por um processo de destilação fracionada.

O etanol hidratado é o álcool encontrado nos postos de combustível, já o etanol anidro normalmente é misturado à gasolina para diminuir seu custo, elevar a octanagem e reduzir emissões de gases poluentes.

2.1.4 Bagaço da cana-de-açúcar como combustível

O resíduo que sai da moenda da usina de açúcar, após a extração do caldo, é o chamado bagaço da cana-de-açúcar, que vira combustível da caldeira que produz vapor para os processos da própria usina, como a própria moenda, turbogeradores de energia elétrica, equipamentos da fábrica de açúcar e outros.

O bagaço da cana-de-açúcar substitui o combustível de fontes não-renováveis, como gás natural e carvão, tradicionalmente mais usados e mais agressivos ao meio ambiente.

2.1.5 Cogeração

O processo de cogeração consiste na transformação da energia térmica proveniente do combustível em outras formas de energia. As mais comuns são a energia mecânica (utilizada no acionamento de equipamentos), a de energia elétrica (que pode ser vendida ou utilizada para consumo interno) e a própria energia térmica (utilizada nos processos que necessitem de calor).

A geração de energia elétrica para consumo próprio da usina e venda de excedente é amplamente utilizada no país. A vantagem dessa prática pode-se citar o fato de que o período de safra da cana-de-açúcar ocorre no de estiagem das principais bacias hidrográficas brasileiras (ANEEL, 2011).

2.2 CALDEIRA AQUOTUBULAR

Segundo Altafini (2008), nas usinas de cana de açúcar predominantemente existem caldeiras aquotubulares devido a sua maior capacidade de geração de vapor superaquecido. As caldeiras aquotubulares são o tipo mais empregado onde há circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes estão pelo lado de fora.

Os componentes geralmente encontrados são mostrados na figura 2 e são eles: fornalha (B), câmara de combustão (C), coletores (A), tubulão (D), superaquecedor (E), soprador de fuligem, pré-aquecedor de ar (G), economizador (F), queimadoras, ventiladores, chaminé (I).

As fornalhas são equipamentos destinados à conversão energética da biomassa em gases à alta temperatura (Lora e Venturini, 2012). O ar primário é introduzido abaixo da grelha e o ar secundário acima da camada de combustível. O superaquecimento do ar é um fator importante para a intensificação da combustão, estando a temperatura máxima do ar limitada pela resistência mecânica do material da grelha. Segundo Lora e Venturini (2012), a temperatura recomendada do ar é da ordem de 200 a 250°C.

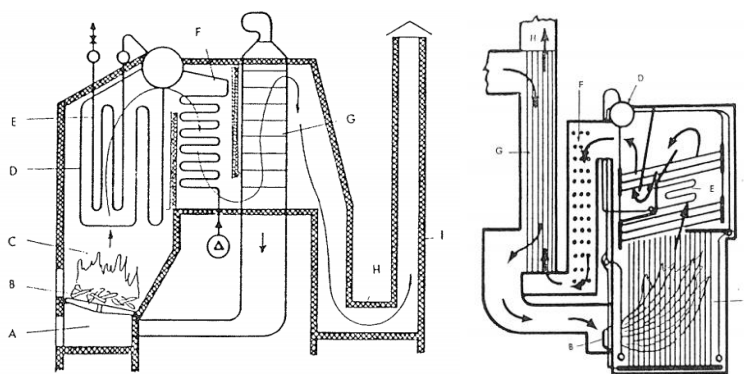


Figura 2- Caldeira com fornalha para queima de biomassa (Pera, 1990)

A fornalha é o local onde se instala o início do processo de queima e o cinzeiro é onde se depositam as cinzas e eventualmente restos de combustíveis que atravessam o suporte de queima sem completarem sua combustão.

A câmara de combustão é o volume onde se deve extinguir toda a matéria do combustível antes dos produtos da combustão atingirem e penetrarem o feixe de absorção do calor por convecção. Por vezes, essa câmara se confunde com a própria fornalha, outras se separam completamente.

O tubulão corresponde ao vaso fechado, à alta pressão, contendo a água no seu interior que ao receber calor se transforma em vapor.

O superaquecedor é responsável pela elevação da temperatura do vapor saturado gerado na caldeira. Todo o vapor ao passar por este aparelho se superaquece.

O economizador é onde a temperatura da água de alimentação sofre elevação, aproveitando o calor sensível residual dos gases da combustão, antes de serem eliminados pela chaminé. Essencialmente, sua função é economizar calor do combustível.

O aquecedor de ar (pré-aquecedor) tem a função de aquecer o ar de combustão para, a seguir, introduzi-lo na fornalha. Assim como o economizador, também promove a economia de combustível.

Por fim, a chaminé é a parte que garante a circulação dos gases quentes da combustão através de todo o sistema para atmosfera.

2.3 COMBUSTÃO DA BIOMASSA

Segundo Lora e Venturini (2012), a combustão é a tecnologia de conversão da biomassa mais antiga e mais difundida comercialmente, destacando-se o uso da madeira e diversos resíduos agroindustriais com bagaço de cana e casca de arroz.

A biomassa é um combustível rico em voláteis, que constituem quase $\frac{3}{4}$ de seu peso total. Assim, o processo de combustão da biomassa irá transcorrer em seis etapas consecutivas bem nítidas, definidas como: secagem, emissão de voláteis, ignição dos voláteis, queima dos voláteis em chama, extinção da chama dos voláteis e combustão do resíduo de carbono (coque). A figura abaixo ajuda na compreensão das etapas da combustão da madeira:

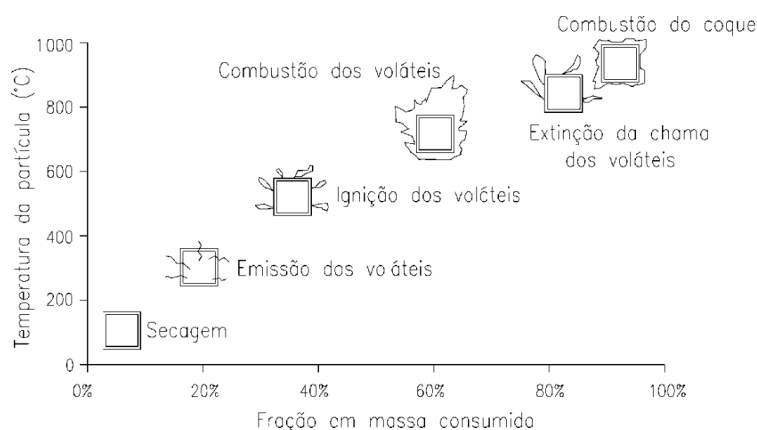


Figura 3- Etapas da combustão da madeira (Lora e Venturini, 2012)

Ainda, caso existam nos produtos de combustão gases combustíveis, como monóxido de carbono, metano e hidrocarbonetos, a combustão é dita incompleta.

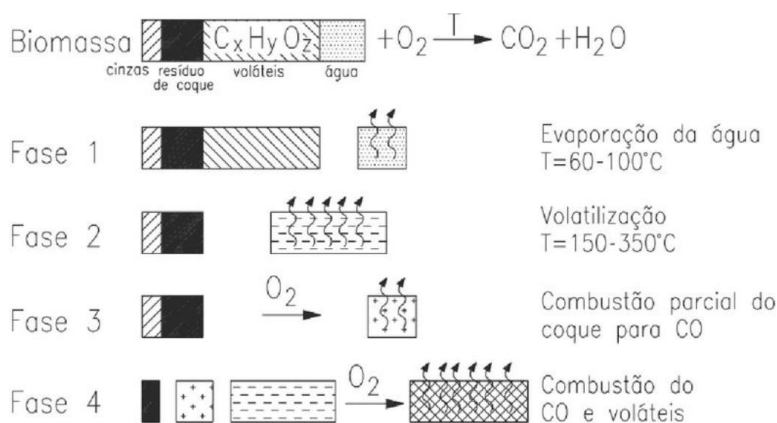
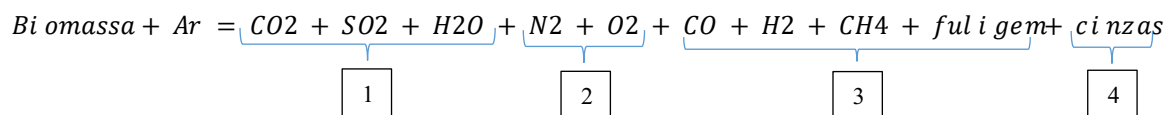


Figura 4- Sequência de combustão de biomassa (Lora e Venturini, 2012)

Para uma biomassa típica, a reação de combustão com ar pode ser descrita pela equação abaixo:



Os grupos numerados de 1 a 4 correspondem a:

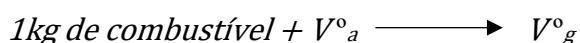
- 1- Produtos da oxidação completa. No caso da biomassa o conteúdo de enxofre é sempre baixo, então a porcentagem de SO₂ é desprezível;
- 2- Ar em excesso e eventualmente a umidade do combustível e do ar;
- 3- Produtos gasosos ainda combustíveis;
- 4- Cinzas e fração mineral não combustível, tais como KCL, HCL, Cu, Pb, Zn, Cd, etc.

A combustão é um procedimento complexo que envolve simultaneamente transferência de calor e de massa com reações químicas e escoamento de fluidos. O diagnóstico do processo de combustão para finalidade de projeto e controle requer o conhecimento das propriedades do combustível e a maneira como estas propriedades influenciam o resultado do processo de combustão.

No processo de combustão existem conceitos importantes para sua total compreensão. Inicialmente, define-se combustão estequiométrica o processo de combustão ideal durante o qual um combustível é completamente queimado com o ar teórico (Çengel, 2013).

A relação ar-combustível é a massa de ar fornecida por unidade de massa de combustível; o ar em excesso fornecido acima da quantidade estequiométrica a fim de garantir uma combustão completa nas condições reais de queima é chamado de excesso de ar; e, por fim, a análise de gases é a coleta de uma amostra dos gases de combustão para determinar o teor dos principais componentes visando o controle correto da combustão.

O balanço de massa e energia nos processos de combustão é o primeiro passo para o dimensionamento ou a avaliação da eficiência de uma fornalha e do controle da combustão através do excesso de ar. A reação de combustão teórica ou estequiométrica de um combustível qualquer com o ar atmosférico pode ser esquematizada como:

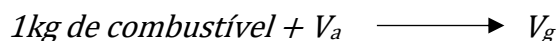


Onde:

$V^{\circ}a$ é o volume de ar teórico ou estequiométrico;

$V^{\circ}g$ é o volume e gases gerados durante a combustão com ar teórico ou estequiométrico.

Por outro lado, a reação de combustão real de um combustível qualquer com o ar atmosférico pode ser esquematizada como:



Onde:

V_a é o volume de ar real;

V_g é o volume e gases gerados durante a combustão em condições reais.

Na prática é necessário fornecer um volume de ar maior que o teoricamente necessário para conseguir a combustão completa do combustível. Isso decorre da dificuldade de se garantir uma mistura adequada do ar com o combustível. Além disso, limitações práticas como tempo de permanência do combustível na fornalha, homogeneidade inadequada da temperatura, umidade, gere uma combustão incompleta. Assim, é preciso fornecer um excesso de ar acima do valor estequiométrico:

$$\alpha = V_a / V^{\circ}a$$

O valor para o excesso de ar para uma determinada aplicação com biomassa depende do tipo de tecnologia de combustão e a umidade da biomassa. Apenas o teste de balanço da caldeira e a construção do gráfico de eficiência em função do excesso de ar permitem definir o valor ótimo de aplicação.

A maneira mais simples de se conhecer o excesso de ar em um sistema de combustão é mediante a análise da composição dos produtos da combustão, já que o ar dilui esses produtos, por isso quanto mais elevado for o conteúdo de O₂, ou quanto menor for o conteúdo de CO₂ existente nos gases de combustão, maior é o excesso de ar. Porém, na prática, observa-se que mesmo para condições em que há excesso de ar podem ser notados indícios de combustão incompleta, como a presença de CO, H₂, CH₄ e fuligem.

Por outro lado, se o excesso de ar na combustão foi superior ao valor ótimo, acontecerá um consumo desnecessário de eletricidade nos ventiladores da caldeira e diminuição da eficiência.

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS CALDEIRAS

Segundo de Souza (2021), a eficiência energética concebe o percentual da energia aproveitada em relação à energia disponível na fornalha. A energia útil de geradores de vapor está relacionada com a entalpia disponível para utilização através de vapor.

Considerando como volume de controle a fornalha e as superfícies de transferência de calor, o rendimento térmico pode ser escrito conforme a Equação (1).

$$\eta = \frac{m_v(h_2-h_1)}{m_c PC}$$

Equação 1

Onde:

η : eficiência térmica do gerador de vapor;

m_v : produção média de vapor (kg/s);

h_2 : entalpia do vapor produzido (kJ/kg);

h_1 : entalpia da água de alimentação da caldeira (kJ/kg);

m_c : consumo médio de combustível (kg/s);

PC : poder calorífico do combustível;

Para a equação (1) a energia útil é a entalpia do vapor total produzido efetivamente pela caldeira, independentemente de sua utilização posterior, e como energia consumida a energia química do combustível empregado na geração do vapor.

Para se calcular a eficiência energética de um sistema de geração de vapor deve ser encontrada as fronteiras de controle de uma maneira global, onde o volume de controle inclua todos acessórios e equipamentos auxiliares e necessários para a produção de vapor. Assim, a energia útil produzida efetivamente é a energia da entalpia do vapor que sai do sistema e é aproveitável para o processo industrial.

Dois métodos básicos de cálculo da eficiência térmica de caldeiras são usados: o método de medida direta no qual os fluxos de entrada e saída de energia são medidos e computados diretamente; e o método indireto ou da avaliação de perdas térmicas.

2.4.1 MÉTODO DIRETO

O método direto consiste em se medir diretamente as vazões de fluidos e suas respectivas condições termodinâmicas, em um intervalo de tempo adequado, a fim de se obter valores médios representativos. É a quantidade de energia produzida na forma de vapor pela

quantidade de energia fornecida pelo combustível, estabelecendo uma relação única de eficiência.

Para o escopo desse trabalho este método não foi utilizado, sendo o método indireto apresentado abaixo utilizado para os cálculos.

2.4.2 MÉTODO INDIRETO

No método indireto, também conhecido como método das perdas, são consideradas todas as perdas existentes no processo de combustão de uma caldeira e através desse método é realizado o acompanhamento da eficiência energética. As perdas podem ser:

- a) Perdas associadas por cinzas;
- b) Perdas por convecção e radiação (calor ao ambiente);
- c) Perdas por entalpia dos produtos da combustão;
- d) Perdas por umidade no combustível;
- e) Perdas por combustão incompleta;
- f) Perdas por combustível não queimado.

Esse método é o mais convencional, pois trata de forma mais sucinta as perdas relacionadas ao processo de combustão e mostra os pontos a serem melhorados para a busca do melhor desempenho de operação do equipamento.

Para melhorar a eficiência térmica de uma caldeira são necessários alguns cuidados que estão relacionados com a economia de combustível, redução das perdas de calor na caldeira, no percurso do fluido dentro do equipamento, dos cuidados relativos à manutenção e utilização da instrumentação de forma correta.

Ainda, para reduzir as perdas de calor gerado pelas caldeiras, pode utilizar o pré-aquecedor para aquecer o ar de entrada das caldeiras antes este ar entre no equipamento e se misture com o combustível, acelerando assim o processo de combustão. Outra forma para otimizar a eficiência térmica das caldeiras é a utilização dos gases gerados pela combustão no economizador, que é o local por onde passa a água que alimenta a caldeira, aumentando a temperatura dessa água, acelerando também o processo de combustão. Além disso, deve-se

tomar cuidado com a umidade do combustível sólido, que influencia diretamente na queima e na produção de calor, impactando diretamente na eficiência energética.

Um balanço de energia aplicado a um sistema de geração de vapor por meio da 1ª Lei da Termodinâmica pode ser expresso por:

$$\sum E_1 - \sum E_2 - \Delta E_i = 0$$

Equação 2

Onde:

$\sum E_1$: energia que entra no sistema;

$\sum E_2$: energia que sai do sistema;

ΔE_i : variação da energia interna do sistema.

Em um sistema operando em regime permanente, onde por exemplo a pressão e temperatura do vapor produzido pela caldeira permanecem constantes, pode-se assumir que:

$$\sum E_1 = \sum E_2$$

A energia útil, por sua vez, pode ser expressa como:

$$Qu = \sum E_1 - \sum E_{perdas}$$

Equação 3

Onde:

Qu : energia útil produzida;

$\sum E_1$: energia total que entra;

$\sum E_{perdas}$: soma de todas as perdas de calor e energia na operação do sistema.

Assim, a equação do rendimento térmico pode ser reescrita como:

$$\eta = \frac{\sum E_1 - \sum E_{perdas}}{\sum E_1}$$

Equação 4

3 DESENVOLVIMENTO

Para a análise da eficiência energética de um gerador de vapor pelo método indireto proposto neste trabalho pegou-se como referência uma caldeira com as seguintes características:

- a) Pressão: 21 bar;
- b) Temperatura: 300° C;
- c) Vazão de combustível: 20,8 ton/h;
- d) Vazão de vapor: 45,6 ton/h.

Esse tipo de caldeira é amplamente utilizado em usinas de cana-de-açúcar para produção de vapor superaquecido que alimentará os processos, equipamentos e fábrica.

3.1 Perdas por combustão incompleta

A perda por combustão incompleta dos combustíveis deve-se a presença de CO nos produtos da combustão, que é aferida na chaminé da caldeira e pode ser calculada pela Equação (5). A presença de fuligem nos produtos de combustão é identificável visualmente, porém sua quantificação é difícil, sendo necessário realizar uma amostragem dos gases da chaminé para determinar sua concentração.

Segundo Çengel (2013), um dispositivo muito usado para analisar a composição dos gases de combustão é o analisador de gás de Orsat: um equipamento de laboratório usado para analisar uma amostra de gás quanto ao conteúdo de oxigênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Também são amplamente usados instrumentos portáteis para medição em campo.

$$p_1 = [CO] * V * PC$$

Equação 5

Onde:

$[CO]$: concentração molar de CO nos produtos de combustão;

V : vazão dos produtos de combustão (moles/s);

PC : poder calorífico de CO, sendo: $PCI_{CO} = 282957 \text{ kJ/kmol}$.

3.2 Perdas por combustível não queimado

Uma amostra das cinzas depositadas no fundo da fornalha com análise ao carbono livre contido determina a energia perdida, que pode ser calculada conforme a Equação (6).

$$p_2 = \frac{[Z] * [CO] * 33880}{PC}$$

Equação 6

Onde:

$[Z]$: teor de cinzas recolhida no cinzeiro, em kg/kg de combustível;

$[CO]$: concentração de carbono nas cinzas;

PC : Poder Calorífico do combustível (kJ/kg);

E 33880 é o Poder Calorífico do carbono livre, em kJ/kg.

3.3 Perdas por convecção e radiação (calor ao ambiente)

As perdas de calor através do invólucro da caldeira dependem do projeto da caldeira, do tipo de revestimento e do estado de conservação. Calor é perdido por radiação e convecção natural ao ambiente através do isolamento térmico da caldeira.

Calor perdido por radiação através de uma superfície ao ambiente externo pode ser calculado por meio da Equação (7).

$$p_3 = \sigma * \varepsilon * A * (T_s^4 - T_{amb}^4)$$

Equação 7

Onde:

σ : constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8} \text{ kJ/sm}^2\text{K}^4$;

ε : emissividade da superfície;

A : área superficial de perdas de calor;

T_s : temperatura absoluta da superfície (K);

T_{amb} : temperatura absoluta do ambiente (K);

Caldeiras com alimentação ou controle manual podem perder calor por radiação direta através das aberturas, como a porta de alimentação da fornalha. O cálculo do calor perdido utiliza a mesma equação de calor irradiado onde a temperatura da superfície emissora é a própria temperatura média da fornalha. Para este estudo, entretanto, esta perda não será contada.

3.4 Perdas associadas por cinzas

As cinzas que se desprendem da massa de combustível caindo através da grelha arrasta calor sensível que não é mais irradiado para a fornalha. Esta perda de calor pode ser estimada pela Equação (8).

$$p_4 = \frac{[Z] * C_z * (T_z - T_{amb})}{PC}$$

Equação 8

Onde:

$[Z]$: teor de cinzas recolhida (kg cinzas/kg combustível);

C_z : calor específico das cinzas ($\cong 1,25$ kJ/kg°C);

T_z : temperaturas das cinzas ao cair no cinzeiro (K);

T_{amb} : temperatura de entrada do combustível (K).

3.5 Perdas por entalpia dos produtos da combustão

A perda por entalpia dos gases de combustão depende da temperatura de saída dos gases e da massa de gases. Considerando a simplificação relativa da aproximação da entalpia de entrada do combustível igual a entalpia de entrada do ar, a perda relativa por entalpia dos produtos de combustão fica conforme expresso pela Equação (9).

$$p_5 = \frac{\left[1 + \left(\frac{a}{c}\right)_{esteq} * \alpha\right] * cp_p * (T_p - T_{ar})}{PC}$$

Equação 9

Onde:

Cp_p : calor específico dos produtos;

T_p : temperatura dos produtos;

T_{ar} : temperatura do ar;

$(a/c)_{esteq}$: relação Ar/Combustível estequiométrica;

α : coeficiente de excesso de ar;

PC : Poder Calorífico do combustível (kJ/kg).

3.6 Perdas por umidade no combustível

A umidade nos produtos de combustão é originada da umidade presente no combustível sendo admitido na fornalha. Nos combustíveis sólidos, como a biomassa, o valor da umidade é um parâmetro muito relevante para o cálculo a combustão e, conseqüentemente, para a aferição da eficiência de uma caldeira.

A água contida no combustível vai absorver calor para sua vaporização que será perdido pelos gases da chaminé. Ela pode ser diminuída por secagem natural ou secagem pelos próprios gases de combustão que saem da caldeira. No caso do bagaço da cana-de-açúcar a umidade presente naturalmente é da ordem de 50%. A perda é calculada pela Equação (10).

$$p_6 = m_{umid} * h_{lv}$$

Equação 10

Onde:

m_{umid} : fluxo de massa de umidade do combustível (kg/s);

h_{lv} : entalpia de vaporização da água a temperatura ambiente (kJ/kg).

4 RESULTADOS

Para produzir os cálculos foi utilizado o *software* Engineering Equation Solver (EES) devido a facilidade que o seu *solver* pode atuar com as equações e variáveis e, principalmente, por conter várias bibliotecas embutidas com funções matemáticas, tabelas de propriedades e propriedades termofísicas para centenas de substâncias.

Todo o memorial de cálculo pode ser encontrado no *apêndice A* deste trabalho, no qual as equações detalhadas no capítulo anterior foram aplicadas.

Dessa forma, o resultado obtido para eficiência energética do gerador de vapor está dentro da faixa esperada, com valor de 82,57%.

Para efeito de comparação com uma usina real, foram conseguidos dados do histórico de eficiência das caldeiras presentes na usina. Para isso, a autorização de divulgação foi permitida sob condição de não exposição do seu nome.

A Figura (5) mostra, das últimas seis safras (2015/16 a 2021) para as seis caldeiras existentes na usina, os dados de eficiência e ano de instalação bem como o valor da umidade do combustível.

Safra	1516		1617		1718		1819		1920		2021			
Unidade	Eficiência	Umidade	Eficiência	Umidade	Eficiência	Umidade	Eficiência	Umidade	Eficiência	Umidade	Eficiência	Umidade	Média	Ano Instalação
	77,00	50,59	77,16	48,73	76,70	48,40	73,56	48,20	73,49	48,57	73,87	47,62	73,01	1970
	81,02	50,59	81,13	48,73	78,62	48,40	70,92	48,20	70,84	48,67	75,71	47,62	69,14	1970
	76,36	50,59	76,53	48,73	77,00	48,40	78,79	48,20	78,75	48,57	67,35	47,62	77,76	1975
	79,38	50,59	71,92	48,73	80,13	48,40	78,15	48,20	78,10	48,57	78,16	47,62	77,05	1977
	78,18	50,59	79,87	48,73	78,77	48,40	79,74	48,20	79,38	48,57	78,25	47,62	78,79	1978
	79,59	50,59	73,11	48,73	82,44	48,40	80,14	48,20	80,10	48,57	79,48	47,62	79,29	1982

Figura 5 – Eficiências das caldeiras e umidades do bagaço da cana-de-açúcar em 06 unidades geradoras de vapor para efeito de comparação

Muito mais do que se chegar a um valor numérico que represente a eficiência térmica de um sistema de geração de vapor, é importante e útil poder interferir diretamente nestas, a fim de diminuí-las. Assim, os resultados dos cálculos das perdas foram plotados na Figura (6) a fim de se identificar onde há maior concentração das perdas.

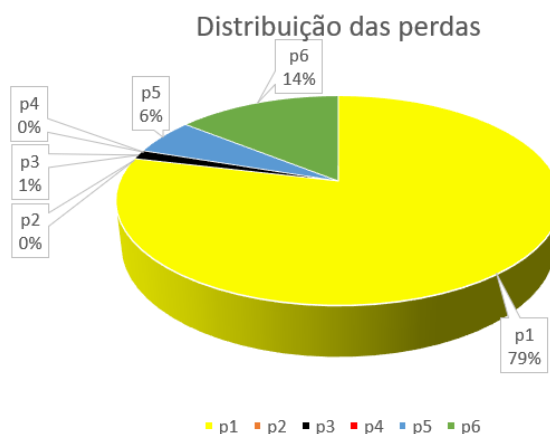


Figura 6 – síntese dos cálculos das perdas

Com isso, pode-se inferir que a principal causa das perdas da usina fictícia é por combustão incompleta, representando 79% do total. Para correção é importante verificar se operação da caldeira está adequada, bem como a manutenção de seus acessórios e equipamentos. Além disso, uma verificação da ventilação e possível correção da relação de ar/combustível.

A segunda maior perda é relacionada a umidade no combustível, com 14% do total. Sabendo-se que a umidade do combustível está em 50% e que esse valor é considerado padrão para os projetos de caldeira com combustível de biomassa, não há intervenções necessária a serem feitas que não gerem um custo desnecessário na produção.

Por fim, a outra perda com alguma relevância no valor final é aquela por entalpia dos produtos da combustão, com 6% do total. Para tentar corrigir também deve-se verificar se a ventilação e relação ar/combustível está adequada.

5 CONCLUSÃO

O método de cálculo de eficiência energética desenvolvido neste trabalho foi implementado e validado através da forte correlação com os valores de eficiência fornecida por uma usina real, com uma diferença de número final em cerca de 8%, sendo considerado um valor plausível para as considerações feitas.

REFERÊNCIAS

DE SOUZA, Gabriel. **Análise de eficiência energética em gerador de vapor aquotubular à carvão e óleo combustível**. 2021. 25 p. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: 01/11/2021. Acesso em: 12 ago. 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015. xxiii, 990 . p.

ORTEZ, Luiz Augusto; LORA, Electo; GÓMEZ, Edgardo. **Biomassa para energia**. 1. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. 732 p.

DA CRUZ, Marlons *et al.* **Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, <https://periodicos.ufv.br/jcec>, ano 2022, p. 1-14, 15 mar. 2022. DOI 10.18540/jcecvl8iss2pp14015-01e. Disponível em: 15/03/2022. Acesso em: 12 ago. 2022.

DA SILVA, William; DA SILVA, Darlan. **Comparação da eficiência energética de caldeiras com palha e sem palha: um estudo de caso**. 2015. 588 p. Dissertação (Engenharia de Produção) - Universidade de Rio Verde, [S. l.], 2015. Disponível em: 01/09/2018. Acesso em: 12 ago. 2022.

Eficiência energética no uso do vapor. Rio de Janeiro, Contrato realizado entre Eletrobrás/PROCEL, e o consorcio EFFICIENTIA/FUPAI, 2005.

LEGISLAÇÃO DO MINISTÉRIO DO TRABALHO, “**Norma Regulamentadora NR-13**”, 26.04.1995.

LEITE, Nilson *et al.* **Tipos e aplicações de caldeiras**. Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica, Rio de Janeiro, ano 2008, p. 1-112, 1 ago. 2008.

LORA, Electo; VENTURINI, Osvaldo. **Biocombustíveis**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 588 p. v. 1 e 2.

REGINA, Larielly *et al.* **Cálculo da relação ar/combustível e a eficiência em caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar**. COBEQ2018 e ENBEQ2018, Uberaba, ano 2018, p. 1-4, 12 ago. 2022. Disponível em: 01/09/2018. Acesso em: 12 ago. 2022.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO

{ TEMA: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO DE GERAÇÃO DE VAPOR }

{ BALANÇO DE COMBUSTÃO DO BAGAÇO DE CANA DE ACÚCAR }

"MASSA MOLAR [kg/kmol]"

```
MW_O2 = MolarMass(Oxygen)
MW_CO2 = MolarMass(CarbonDioxide)
MW_C = MW_CO2 - (MW_O2)
MW_H2 = MolarMass(Hydrogen)
MW_H2O = MolarMass(Water)
MW_N2 = MolarMass(Nitrogen)
MW_Ar = MolarMass(Air_ha)
MW_CO = MolarMass(CarbonMonoxide)
```

"considerando 1kg de bagaço seco para calculo [g/kg]:

C: 480
H: 60
O: 440
N: 5
Cinzas: 15"

"REAÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA: Bagaço + ar seco $\rightarrow$ CO₂ + H₂O"

"considerando 1kg de bagaço seco para calculo [g/kg]:

C: 480
H: 60
O: 440
N: 5
Cinzas: 15"

"nee[1] * C + nee[2] * H + nee[3] * O + nee[4] * N + nee[5] * (O2 + 3,76 * N2) ->
nse[1] * CO2 + nse[2] * H2O + nse[3] * N + nse[4] * 3,76 * N2"

nee[1] = 40
nee[2] = 60
nee[3] = 27,5
nee[4] = 0,357

nse[1] = 40
nse[2] = 30
nse[3] = 2

//Balanço para o O

nee[3] + nee[5] * 2 = nse[1] * 2 + nse[2]

//Balanço para o N

nee[4] + nee[5] * 3,76 * 2 = nse[3] + nse[4] * 3,76 * 2

//Massa de ar necessária para 1kg de bagaço seco"

Massa_ar = (nee[5] * MW_O2) + (nee[5] * 3,76 * MW_N2)

//Relação ar-combustível estequiométrica

Rel_ar_comb_esteq = Massa_ar / 1000 {massica}
Rel_ar_comb_esteq2 = nee[5] + nee[5] * 3,76 {molar}

//Relação ar-combustível 50% na base úmida

Rel_ar_comb_esteq_umido = 0,5 * Rel_ar_comb_esteq

// Excesso de ar

excesso_ar = 30 [%]
excesso_ar = 100 * (1 - phi_molar) / phi_molar

"REAÇÃO INCOMPLETA: Bagaço seco + ar seco -> CO2 + CO + H2O + O2 + N2"

"ne[1] * C + ne[2] * H + ne[3] * O + phi * nest * O2 + ne[4] * 3,76 * N2 -> ns[1] * CO2
+ ns[2] * CO + ns[3] * H2O + ns[4] * O2 + ns[5] * N2"

$\text{phi_molar} = \text{Rel_ar_comb_esteq2} / \text{Rel_real_molar}$
 $\text{Rel_real_molar} = \text{ne}[4] + \text{ne}[4] * 3,76$

$\text{ne}[1] = 40$
 $\text{ne}[2] = 60$
 $\text{ne}[3] = 27,5$

// Balanço para o C

$\text{ne}[1] = \text{ns}[1] + \text{ns}[2]$

//Balanço para o H

$\text{ne}[2] = \text{ns}[3] * 2$

//Balanço para o O

$\text{phi_molar} * \text{nest} = \text{ne}[4]$
 $\text{ne}[3] + \text{ne}[4] * 2 = \text{ns}[1] * 2 + \text{ns}[2] + \text{ns}[3] + \text{ns}[4] * 2$

//Balanço para o N

$\text{ne}[4] * 3,76 * 2 = \text{ns}[5] * 2$

//Análise dos gases da combustão: 25% do carbono dos reagentes reagiram e geraram CO nos produtos

$(\text{ns}[2] / \text{ne}[1]) * 100 = 25$

//Relação ar-combustível

$\text{MW_Comb} = \text{MW_C} + \text{MW_O2} + \text{MW_H2}$
 $\text{Rel_real_mássica} = \text{Rel_real_molar} * (0,21 * \text{MW_O2} + 0,79 * \text{MW_N2}) / \text{MW_Comb}$
 $\text{phi_massica} = \text{Rel_ar_comb_esteq} / \text{Rel_real_mássica}$

//Relação ar-combustível 50% na base úmida real

$\text{Rel_mássica_umido} = 0,5 * \text{Rel_real_mássica}$
 $\text{Rel_molar_umido} = 0,5 * \text{Rel_real_molar}$

{ TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA }

"Entalpia de Formação dos reagentes"

$h_{fe}[1] = \text{Enthalpy_formation}(\text{C2})$

$h_{fe}[2] = \text{Enthalpy_formation}(\text{H2})$

$h_{fe}[3] = \text{Enthalpy_formation}(\text{O2})$

$h_{fe}[4] = \text{Enthalpy_formation}(\text{N2})$

"Entalpia de Formação dos produtos"

$h_{fs}[1] = \text{Enthalpy_formation}(\text{CO2})$

$h_{fs}[2] = \text{Enthalpy_formation}(\text{CO})$

$h_{fs}[3] = \text{Enthalpy_formation}(\text{H2O})$

$h_{fs}[4] = \text{Enthalpy_formation}(\text{O2})$

$h_{fs}[5] = \text{Enthalpy_formation}(\text{N2})$

"CP dos produtos"

"Observação: A entalpia da mistura de produtos é estimada usando calores específicos constantes avaliados a 1200K ($= 0,5(T_i + T_{ad_Chute})$), onde T_{ad} é estimado em aproximadamente 2100K."

$T_i = 298 \text{ [K]}$

```

Tad_Chute = 2186 [K]
CP[1] = cp(CO2;T = (Ti + tad_Chute) / 2)
CP[2] = cp(CO;T = (Ti + tad_Chute) / 2)
CP[3] = cp(H2O;T = (Ti + tad_Chute) / 2)
CP[4] = cp(O2;T = (Ti + tad_Chute) / 2)
CP[5] = cp(N2;T = (Ti + tad_Chute) / 2)

```

"Entalpia dos reagentes --> h_reagentes"

```
h_reagentes = SUM(ne[i]*(h_fe[i]);i = 1;4)
```

"Entalpia dos Produtos --> h_produtos"

```
h_produtos = SUM(ns[i]*(h_fs[i]+CP[i]*(Tad - Ti));i = 1;5)
```

h_reagentes = h_produtos "esta equação nos dá a Temperatura adiabática de chama (Tad)"

"Calor recebido pelo Vapor --> Q_Vapor"

```

Massa_Vapor = 45,6 * 1000/3600 [kg/s]
m_dot_Vapor = (Massa_Vapor)/MolarMass(H2O)
T_AguaAlimentação = 109 + 273,15 [K]
X_vapor = 1
P_Vapor = 21000 [kPa]
Q_vapor = m_dot_Vapor*(IntEnergy(Steam_IAPWS;P=P_Vapor;x=X_Vapor) -
IntEnergy(Steam_IAPWS;P=P_Vapor;T = T_AguaAlimentação))

```

{ PERDAS POR COMBUSTÃO INCOMPLETA }

```

Num_mol_prod = ns[1] + ns[2] + ns[3] + ns[4] + ns[5]
Duplicate x=1;5
teor[x] = ns[x] / Num_mol_prod

```

End

```

Duplicate x = 1;5
teor_%[x] = teor[x] * 100

```

End

"----Calculo das perdas por combustão incompleta----"

```

m_dot_ar = 31,2 * (1000/3600) [kg/s]
m_dot_bag = 20,8 * (1000/3600) [kg/s]
PCI_CO = LowerHeatingValue(CO)
m_dot_produtos = m_dot_ar

```

$$p1 = \text{teor}[2] * m_dot_produtos * PCI_CO$$

{ PERDAS POR COMBUSTÍVEL NÃO QUEIMADO }

$$Z = 0,05$$

$$CO_cinzas = 0,015$$

$$PCI = 8911 \text{ [kJ/kg]}$$

$$p2 = (Z * CO_cinzas * (33880 / (MolarMass(C) + MolarMass(O)))) / (PCI / (MolarMass(C) + MolarMass(H) + MolarMass(O)))$$

{ PERDAS POR CALOR AO AMBIENTE }

$$\sigma = 5,67 * 10^{(-8)} \text{ [kJ/s*m}^2\text{*K}^4\text{]}$$

$$\epsilon = 0,56$$

$$A = 1000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$T_sup = 0,058 * T_{ad}$$

$$T_amb = 303,15 \text{ [K]}$$

$$p3 = \sigma * \epsilon * A * (T_sup^4 - T_amb^4)$$

{ PERDAS POR CALOR SENSÍVEL DAS CINZAS }

$$C_Z = 1,25 \text{ [kJ/Kg*K]}$$

$$T_cinzas = 1473 \text{ [K]}$$

$$p4 = Z * C_Z * (T_cinzas - T_amb) / PCI$$

{ PERDAS POR ENTALPIA DOS PRODUTOS DE COMBUSTÃO }

$$T_cald = 300 + 273,15 \text{ [K]}$$

$$T_prod = T_cald$$

$$\alpha = 1,3$$

$$p5 = (1 + Rel_molar_umido * \alpha) * (\sum(CP[i]; i = 1; 5) / 5) * (T_prod - T_amb) / (PCI / (MolarMass(C) + MolarMass(H) + MolarMass(O)))$$

{ PERDAS POR UMIDADE NO COMBUSTÍVEL }

$$h_lv = \text{Enthalpy_vaporization}(\text{Water}; T=T_amb)$$

$$m_dot_umidade = m_dot_Vapor / 2$$

$$p6 = m_dot_umidade * h_lv$$

{ BALANÇO DE ENERGIA DA CALDEIRA }

$$h_vapor = \text{Enthalpy_vaporization}(\text{Water}; P=P_Vapor)$$

$h_{\text{agua}} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{\text{AguaAlimentação}}; P=101,3)$

$Q_{\text{dot_u}} = \text{Massa_Vapor} * (h_{\text{agua}} - h_{\text{vapor}})$

$\text{SIGMA_Perdas} = p1 + p2 + p3 + p4 + p5 + p6$

$Q_{\text{dot_u}} = E_{\text{ent}} - \text{SIGMA_Perdas}$

{ BALANÇO DE ENERGIA DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO NA CALDEIRA }

$T[1] = T_{\text{AguaAlimentação}}$

$P[1] = 101,3$

$h[1] = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T[1]; P=P[1])$

$P[2] = P_{\text{Vapor}}$

$T[2] = T_{\text{cald}}$

$h[2] = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T[2]; P=P[2])$

{ EFICIÊNCIA TÉRMICA DA CALDEIRA }

$\text{Eta} = ((E_{\text{ent}} - \text{SIGMA_Perdas}) / E_{\text{ent}}) * 100$

RESULTADOS:

Unit Settings: SI K kPa kJ molar deg

$A = 1000 \text{ [m}^2\text{]}$	$\alpha = 1,3$	$\text{CO}_{\text{cinzas}} = 0,015$	$C_z = 1,25 \text{ [kJ/Kg}^\circ\text{K]}$	$\epsilon = 0,56$	$\eta = 80,31\%$
$\text{excesso}_{\text{ar}} = 30 \text{ [\%]}$	$\dot{Q}_{\text{ar}} = 610700 \text{ [kJ/s]}$	$h_{\text{agua}} = 48534 \text{ [kJ/kmol]}$	$h_v = 43771 \text{ [kJ/kmol]}$	$\dot{h}_{\text{produtos}} = 3,322\text{E}+07 \text{ [kJ/kmol]}$	$\dot{h}_{\text{reagentes}} = 3,322\text{E}+07 \text{ [kJ/kmol]}$
$h_{\text{vapor}} = 8200 \text{ [kJ/kmol]}$	$\text{Massa}_{\text{ar}} = 5665 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{Massa}_{\text{vapor}} = 12,67 \text{ [s/kg]}$	$\text{MW}_{\text{Ar}} = 28,96 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{MW}_{\text{C}} = 12,01 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{MW}_{\text{CO}} = 28 \text{ [kg/kmol]}$
$\text{MW}_{\text{CO}_2} = 44,01 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{MW}_{\text{Comb}} = 46,03 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{MW}_{\text{H}_2} = 2,016 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{MW}_{\text{H}_2\text{O}} = 18,02 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{MW}_{\text{H}_2} = 28,01 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{MW}_{\text{O}_2} = 32 \text{ [kg/kmol]}$
$\dot{m}_{\text{ar}} = 8,667 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{\text{bag}} = 5,778 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{\text{produtos}} = 8,667 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{\text{umidade}} = 0,3515 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{\text{vapor}} = 0,7031 \text{ [s-kmol/kg}^2\text{]}$	$\dot{m}_{\text{est}} = 69,71$
$\text{Nummol}_{\text{prod}} = 289$	$p1 = 84953 \text{ [kg-s}^2\text{/s-kmol)}]$	$p2 = 5,002934 \text{ [kg/s)}]$	$p3 = 1962 \text{ [kg/s)}]$	$p4 = 5,008264$	$p5 = 8011$
$p5 = 10387 \text{ [kg-s}^2\text{/s-kmol)}]$	$\text{PCI} = 8911 \text{ [kJ/kg]}$	$\text{PCI}_{\text{CO}} = 282957 \text{ [kJ/kmol]}$	$\phi_{\text{massica}} = 0,0354 \text{ [kg}^2\text{/kmol}^2\text{]}$	$\phi_{\text{molar}} = 0,7692 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{PVapor} = 21000 \text{ [kPa]}$
$Q_u = 510890 \text{ [s/kg]}$	$Q_{\text{vapor}} = 22582 \text{ [kJ/s]}$	$\text{Rel}_{\text{ar,comb,esteq}} = 5,665 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{Rel}_{\text{ar,comb,esteq2}} = 196,4$	$\text{Rel}_{\text{ar,comb,esteq,umido}} = 2,832 \text{ [kg/kmol]}$	$\text{Rel}_{\text{molar,umido}} = 127,6 \text{ [kmol/kg]}$
$\text{Rel}_{\text{mássica,umido}} = 80 \text{ [kmol/kg]}$	$\text{Rel}_{\text{real,molar}} = 255,3 \text{ [kmol/kg]}$	$\text{Rel}_{\text{real,mássica}} = 160 \text{ [kmol/kg]}$	$\sigma = 5,670\text{E}-08$	$\Sigma_{\text{Perdas}} = 107815$	$T_{\text{ad}} = 5234 \text{ [K]}$
$T_{\text{adChule}} = 2186 \text{ [K]}$	$T1 = 298 \text{ [K]}$	$T_{\text{AguaAlimentação}} = 382,2$	$T_{\text{amb}} = 303,2 \text{ [K]}$	$T_{\text{cald}} = 573,2$	$T_{\text{cinzas}} = 1473 \text{ [K]}$
$T_{\text{prod}} = 573,2$	$T_{\text{sup}} = 303,6 \text{ [K]}$	$X_{\text{vapor}} = 1$	$Z = 0,05$		