

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
REDE DE ENSINO DOCTUM**

**MARIANA CRISTINA GOMES VIEIRA
MARTINELE VIEIRA FONTANA**

**COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
TERMELÉTRICA ATRAVÉS DA BIOMASSA E CARVÃO MINERAL**

**JOÃO MONLEVADE
2019**

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
REDE DE ENSINO DOCTUM DE**

**MARIANA CRISTINA GOMES VIEIRA
MARTINELE VIEIRA FONTANA**

**COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
TERMELÉTRICA ATRAVÉS DA BIOMASSA E CARVÃO MINERAL**

**Projeto de Pesquisa apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da
Faculdade Doctum de João Monlevade,
como requisito para aprovação na
disciplina TCC II, orientado pela Prof.
Ana Regina Bretz.**

**Área de Concentração: Sistema de
Energia.**

**JOÃO MONLEVADE
2019**

FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **ANALOGIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM TERMELÉTRICA ATRAVÉS DA BIOMASSA E CARVÃO MINERAL**, elaborado pela aluna **MARIANA CRISTINA GOMES VIEIRA** foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

João Monlevade, 09 de Julho de 2019



Ana Regina Lara Bretz



M.Sc. Francisca Daniela Andreu Simões Mores Lage



M.Sc Rieder de Oliveira Neto


FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **ANALOGIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM TERMELÉTRICA ATRAVÉS DA BIOMASSA E CARVÃO MINERAL**, elaborado pelo aluno MARTINELE VIEIRA FONTANA foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

João Monlevade, 09 de Julho de 2019.



Ana Regina Lara Bretz



M.Sc. Francisca Daniela Andreu Simões Mores Lage



M.Sc Rieder de Oliveira Neto

AGRADECIMENTOS MARIANA

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo que Ele proporcionou à minha vida e, nesse momento tão especial, agradeço a Ele por me possibilitar os aprendizados adquiridos ao longo da vida universitária, dando-me inspiração e paciência para vencer os obstáculos. Ele é o maior mestre de todos!

Agradeço também aos meus pais, Almir e Marinete, pelos ensinamentos adquiridos ao longo da vida, e ao meu irmão Matheus, pela força e coragem de nunca desistir de nada.

Agradeço a todos os colegas do curso de Engenharia Elétrica, pelo carinho, atenção, respeito e cordialidade comigo; agradeço principalmente a minha Orientadora, professora Ana Bretz, pelo tempo disponibilizado, por sua sabedoria e por seus ensinamentos transmitidos, até por nos recepcionar em sua casa com uma gigante mesa de café, preparada com muito amor e carinho. Agradeço também a meu Co-orientador, professor Rieder Neto, por sua disponibilidade, bondade e paciência para passar todo o conteúdo necessário para que pudéssemos dar continuidade ao desenvolvimento do nosso trabalho, literalmente você foi luz em meio à escuridão em que estávamos. E agradeço, ainda, à professora de TCC, Thais Araújo, pelos ensinamentos, pela ajuda quando foi solicitada, pelas cobranças feitas necessariamente ao longo deste trabalho.

Agradeço à Rede Doctum por disponibilizar o curso de Engenharia Elétrica, que me trouxe uma vasta bagagem de conhecimentos os quais eu não imaginava que teria. Chorei, ri, surtei, me acalmei, ajudei e fui ajudada, principalmente quando precisei me ausentar da faculdade em virtude de um tratamento de saúde, neste período, recebi total apoio da instituição.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha jornada acadêmica, o meu muito obrigada.

AGRADECIMENTO MARTINELE

Agradeço aos professores da Rede de Ensino Doctum, por dedicarem tempo e atenção a nós, principalmente a professora Ana Regina Lara Bretz, ao professor Rieder de Oliveira Neto e ao coordenador do Curso, professor Hernani Santiago.

Agradeço, em especial, a Deus por abençoar meus passos durante todo o curso, por ter me dado força e saúde para enfrentar os momentos de dificuldades.

Agradeço a toda minha família por me apoiar incondicionalmente, pelo amor e pelo incentivo.

Agradeço aos colegas de sala por terem compartilhado conhecimentos e experiências durante toda essa jornada.

Agradeço uma pessoa especial em minha vida, Mariluz Marra, por me incentivar e apoiar sempre, por passarmos juntas todos os momentos.

Muito obrigada a todos.

O importante não é ver o que ninguém nunca viu, mas sim, pensar o que ninguém nunca pensou sobre algo que todo mundo vê.

(Arthur Schopenhauer, 1788-1860)

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BIG – Banco de Informação de Geração

EES – Engineering Equation Solver

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

MME – Ministério de Minas e Energia

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCP – Poder Calorífico a Pressão Constante

PCS – Poder Calorífico Superior

PCU – Poder Calorífico Útil

PCV – Poder Calorífico a Volume Constante

UHE – Usina Hidrelétrica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Banco de informações de Geração de energia elétrica	20
Figura 2- Ciclo Rankine Ideal básico	25
Figura 3 - Diagrama temperatura \times Entropia do ciclo Rankine Ideal em uma planta térmica com turbina a vapor.....	25
Figura 4 - Aeolipile de Hero	26
Figura 5 - Esquema e principais componentes de uma termelétrica a vapor.....	28
Figura 6- Equipamento calorímetro	32
Figura 7 - Processo de mineração do carvão mineral	36
Figura 8 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral.....	36
Figura 9 - Da Biomassa a Eletricidade.....	40
Figura 10 - Eficiência do Gerador	46
Figura 11- Ciclo de Rankine Simples Ideal	50
Figura 12 - Fluxograma da modelagem matemática desenvolvida.....	59
Figura 13 - Linguagem de programação-carvão mineral	60
Figura 14 - Linguagem de programação-bagaço de cana.....	62
Figura 15 - Programação do ciclo de Rankine.....	64
Figura 16 - Resultados do Ciclo de Rankine - Carvão Mineral	66
Figura 17 - Resultados ciclo de Rankine - bagaço de cana.....	68
Figura 18 - Representação gráfica da eficiência dos dois Combustíveis.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do Carvão Brasileiro	38
Tabela 2 - Característica do carvão internacional	38
Tabela 3 - Biomassas mais utilizadas no Brasil	49
Tabela 4 - Resultados obtidos na simulação	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Calor específico dos elementos	30
Quadro 2- Composto químico.....	33
Quadro 3 - Parâmetros utilizados para a analogia.....	60
Quadro 4 - Eficiência do Ciclo de Rankine.....	69

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso, foi realizado um estudo de referência bibliográfico sobre comparação da Geração de Energia Elétrica em Termelétrica através da Biomassa e Carvão Mineral. A pesquisa tem como questionamento sobre as termelétricas a vapor e os tipos de combustíveis mais utilizados como fonte de energia. Os combustíveis têm como referência bibliográfica a ANEEL. O desenvolvimento da modelagem matemática teve como referência bibliográfica os autores ÇENGEL e TOLMASQUIM. Para comparação foi realizado duas equações modeladas “calor do combustível e transferência de calor” junto com o ciclo de Rankine. Os combustíveis em análise foram o carvão mineral combustível não renovável e a biomassa bagaço de cana, fonte de energia renovável muito usada em parte do Brasil. Para auxiliar as equações foi utilizado o Software *Engineering Equation Solver (EES)*. O software realiza cálculos matemáticos complexos e possibilita gerar gráficos para facilitar a comparação da eficiência dos combustíveis. Este estudo propõe analisar se a biomassa é tão eficiente quanto o carvão mineral na geração de energia elétrica através das termelétricas baseando em teorias e modelagens matemáticas. Os resultados matemáticos da eficiência de cada combustível analisado demonstraram que o carvão mineral é mais eficiente que o combustível bagaço de cana, concluímos então que a diferença entre eles é pequena. Sugerimos para estudos futuro a seguinte pergunta “Considerando que existe diferença na eficiência da Geração de Energia Elétrica em Termelétrica através da Biomassa e do Carvão Mineral qual será o impacto na produção de energia elétrica no Brasil?”

Palavra Chave: Termelétrica, Ciclos Térmicos, Biomassa, Carvão Mineral, Modelo Matemático.

ABSTRACT

In this work, a bibliographic reference study was carried out on the comparison of Generation of Electric Energy in Thermoelectric through Biomass and Mineral Coal. The research question is about the thermoelectric steam and the types of fuel most used as an energy source. Fuels have as bibliographical reference the ANEEL. The development of mathematical modeling had as bibliographical reference the authors ÇENGEL and TOLMASQUIM. For comparison, two equations were modeled "fuel heat and heat transfer" along with the Rankine cycle. The fuels under analysis were non-renewable fuel coal and biomass sugarcane bagasse, a renewable energy source widely used in part of Brazil. To support the equations, the *Engineering Equation Solver (EES)* Software was used. The software performs complex mathematical calculations and enables graphing to facilitate comparison of fuel efficiency. This study proposes to analyze if biomass is as efficient as mineral coal in the generation of electric energy through thermoelectric plants based on mathematical theories and models. The mathematical results of the efficiency of each analyzed fuel showed that the coal is more efficient than the fuel sugarcane bagasse, we conclude then that the difference between them is small. We suggest for future studies the following question "Considering that there is a difference in the efficiency of the Generation of Electric Energy in Thermoelectric through Biomass and Mineral Coal what will be the impact on the production of electric energy in Brazil?"

Keyword: Thermoelectric, Thermal Cycles, Biomass, Coal, Mathematical Model.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3 MARCO TEÓRICO	20
3.1 Termodinâmica Básica Aplicada em Termelétrica	21
3.2 Ciclo de Carnot	24
3.3 Ciclo de Rankine	24
3.4 Funcionamento de uma Termelétrica	26
3.4.1 Termelétrica a vapor	27
3.4.1.1 <i>Princípio de funcionamento a vapor</i>	29
3.5 Calor Específico da Água	29
3.5.1 Valores de calor específico	29
3.5.2 Determinação do calor específico (c).....	30
3.6 Poder calorífico dos combustíveis empregado nas termelétricas PCP, PCV, PCS E PCI	30
3.6.1 Poder calorífico a pressão constante (PCP)	30
3.6.2 Poder calorífico a volume constante (PCV)	31
3.6.3 Poder calorífico superior (PCS)	31
3.6.4 Poder calorífico inferior (PCI).....	31
3.6.5 A unidade do poder calorífico	31
3.6.6 Determinação do Poder Calorífico	32
3.6.6.1 <i>Para calcular poder calorífico</i>	32
3.7 Combustíveis Empregados à Termelétrica	34
3.7.1 O carvão mineral.....	35
3.7.1.1 <i>Poder calorífico do carvão mineral</i>	38

3.7.2 Biomassa	39
3.7.2.1 <i>Palha da cana</i>	40
3.7.2.2 <i>Bagaço de cana</i>	41
<u>3.7.2.2.1 Poder calorífico do bagaço de cana de açúcar</u>	<u>41</u>
3.8 Modelagem Matemática para Termelétricas	43
3.8.1 Eficiência conversão de energia	43
3.8.1.1 <i>Eficiências de dispositivos mecânicos e elétricos</i>	45
4 METODOLOGIA	46
5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E TÉCNICOS	48
5.1 Análise Teórica: Pesquisa Exploratória.....	48
5.2 Ciclo de Rankine Ideal	49
5.3 Estudo de Eficiência para cada Componente do ciclo de Rankine.....	52
5.3.1 Caldeiras.....	52
5.3.1.1 <i>Disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho</i>	52
5.3.1.2 <i>Força motriz para a circulação do fluido de trabalho</i>	53
5.3.1.3 <i>Nível de pressão de operação</i>	54
5.3.1.4 <i>Tipo de combustível ou fonte de calor</i>	54
5.3.1.5 <i>Tecnologia de combustão</i>	55
5.3.1.6 <i>Medida do calor de reação</i>	55
5.3.2 Turbinas.....	56
5.3.2.1 <i>Potência mecânica da turbina</i>	57
5.3.3 Turbinas – Gerador.....	57
5.3.4 Condensadores.....	58
5.4 Programa Engineering Equation Solver (EES).....	58
5.5 Modelagem Matemática - Carvão Mineral x Bagaço de Cana	59
5.5.1 Simulação utilizando o combustível Carvão Mineral.....	60
5.5.2 Simulação, utilizando o combustível Bagaço de Cana de Açúcar:	62

5.5.3 Modelagem do Ciclo de Rankine - carvão mineral.....	64
5.5.3.1 <i>Ciclo de Rankine utilizando temperatura final do combustível carvão mineral</i>	65
5.5.4 Modelagem do Ciclo de Rankine – bagaço de cana.....	67
6 CONCLUSÃO	70
ANEXO A – Poder Calorífico Inferior dos Combustíveis	71
REFERÊNCIA	72

1 INTRODUÇÃO

A busca por novas fontes de energia tem feito com que incentivos à pesquisa nesta área tenham se tornado cada vez maior. Pesquisas sobre fontes renováveis têm sido o foco nessas últimas décadas, devido principalmente ao acelerado consumo e ao breve esgotamento de petróleo (ALVES, 2011).

No Brasil, utiliza-se a energia termelétrica de forma estratégica, pois esta pode ser produzida em uma quantidade constante durante o ano inteiro, diferentemente das hidrelétricas, as quais possuem a produção dependente do nível de rios. Especificamente, as termelétricas complementam a matriz energética das hidrelétricas, que são acionadas predominantemente quando há necessidade, como em períodos de estiagem.

A utilização do carvão mineral nas termelétricas além de não ser uma fonte de combustível renovável e limpa, o mesmo provoca impactos ambientais no solo, consequências para saúde humana pelos gases liberado na queima, e possui uma contribuição direta para a destruição da camada do ozônio.

Por outro lado, o uso da biomassa nas termelétricas não emite uma quantidade agressiva de gás metano na atmosfera; as cinzas são menos agressivas ao meio ambiente do que as provenientes de combustíveis fósseis e do carvão mineral; possuem um menor risco ambiental, já que se trata de recurso renovável, cujas emissões de gases afetam menos a camada de ozônio, que minimiza impactos ambientais e preserva a saúde das pessoas envolvidas nas operações em que a biomassa está envolvida.

Conforme a ANEEL (2017), as usinas termelétricas de geração de energia a partir da biomassa têm como características serem uma fonte limpa e renovável, entretanto a sua participação na matriz energética ainda é consideravelmente mínima (menos que 0,07%). A utilização da biomassa para geração de energia elétrica é uma alternativa não apenas econômica e viável, mas também com vantagem social e ambiental. Pois pensando no destino dos resíduos brasileiros que são desperdiçados de forma aleatória, ou seja, sem qualquer tipo de tratamento e, conseqüentemente, vindo a gerar problemas de saúde na sociedade e no meio ambiente.

Este trabalho propôs analisar se a biomassa é tão eficiente quanto o carvão mineral na geração de energia elétrica em termelétricas, a partir de teorias e modelagens matemáticas. A pergunta que guiou a investigação foi: será que a utilização da biomassa é realmente tão eficiente quanto à do carvão mineral?

Pretendeu-se realizar o estudo sobre a substituição da fonte de energia carvão mineral por biomassa, visto que a biomassa foi escolhida tendo em vista os altos índices da produção brasileira.

Metodologicamente, o estudo baseou-se em pesquisa bibliográfica e emprego de modelos matemáticos. Os principais autores utilizados foram a ANEEL, EPE, ÇENGEL e TOLMASQUIM.

2 OBJETIVOS

Com base em estudos científicos, a finalidade deste trabalho é analisar comparativamente a eficiência do combustível biomassa e do combustível carvão mineral, o mais utilizado nas termelétricas do Brasil.

2.1 Objetivo Geral

- Indicar o modelo matemático que possibilite analisar a eficiência energética de uma termelétrica a vapor, usando Carvão Mineral x Biomassa.

2.2 Objetivos Específicos

- Compreender como funciona uma Termelétrica a vapor.
 - Estudar os Ciclos Térmicos deste processo.
- Estudar a aplicabilidade do uso do carvão mineral nas usinas termelétricas.
- Estudar sobre a aplicação da Biomassa nas termelétricas.
- Escolher a Biomassa que será comparada com o carvão. Para isso, será necessário:
 - Realizar estudo sobre as fontes de biomassa que podem ser utilizadas nas termelétricas a vapor.
 - Pesquisar qual desses combustíveis (biomassa) é o mais utilizado no Brasil.
- Pesquisar as teorias e os modelos matemáticos existentes nas termelétricas para as duas fontes: carvão e biomassa escolhida.
- Comparar as etapas de cálculo da eficiência energética do processo produtivo de Energia Elétrica entre as duas fontes de combustíveis.
- Analisar e indicar um Modelo Matemático que possibilite a comparação de eficiência de um processo produtivo de uma termelétrica a vapor, a partir do uso dos combustíveis: biomassa e carvão mineral.

3 MARCO TEÓRICO

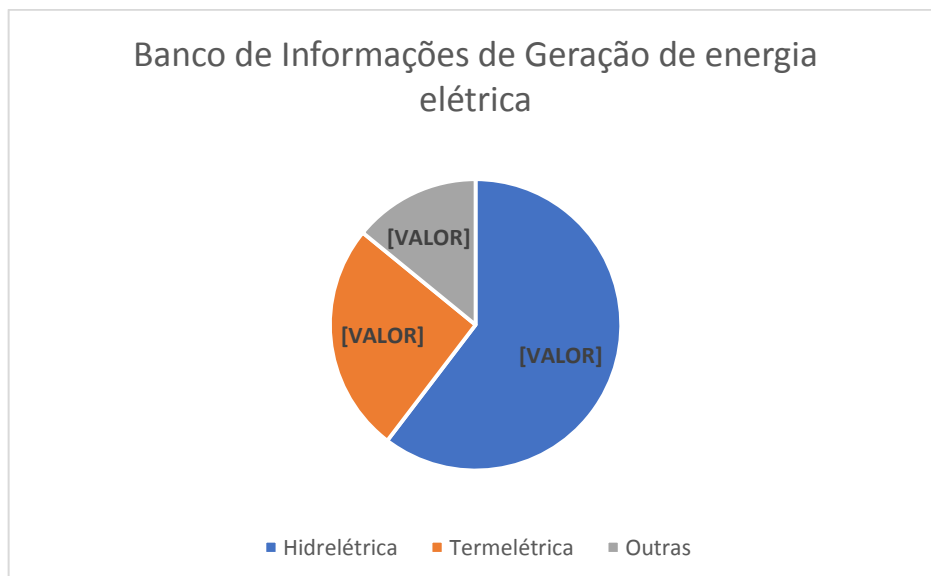
As fontes de energia elétrica são extremamente importantes para o desenvolvimento do país, exigindo qualidade e capacidade para atender a demanda de cada região. O Brasil conta com as hidrelétricas como principal fonte de energia por possuir água em abundância em seu território, as termelétricas são fontes de energia elétrica adotada em segundo plano, conforme informações do gráfico (figura 1).

De acordo com a ANEEL-BIG (2018), Agência Nacional de Energia Elétrica - Banco de Informações de Geração, 60,37% da produção de energia no Brasil é da fonte hidrelétrica, 25,53% termelétrica e 14,1% outras fontes.

Usinas hidrelétricas (UHE) são constituídas por estrutura de barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força onde são localizados as turbinas e o vertedouro.

As termoelétricas são instalações industriais que geram energia elétrica a partir de fontes de calor. Cada instalação utiliza combustíveis específicos, como os derivados fósseis ou biomassa.

Figura 1 – Banco de informações de Geração de energia elétrica



Fonte ANEEL-BIG (2018)

3.1 Termodinâmica Básica Aplicada em Termelétrica

A 1ª Lei termodinâmica é a ciência que explica e define a transformação de uma energia em outra, seja ela química para térmica, térmica para mecânica e mecânica para térmica. Os dois princípios básicos da termodinâmica são (STUCHI, 2015):

1.ª Lei a energia deve ser sempre conservada.

2.ª Lei somente uma parcela da energia disponível poderá ser convertida em energia para trabalho.

A Primeira Lei da Termodinâmica é exemplificada através da equação 1 (STUCHI, 2015):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_s * \left[h_s + \frac{v_s^2}{2} + g \cdot Z_s \right] - \sum_e \dot{m}_e * \left[h_e + \frac{v_e^2}{2} + g \cdot Z_e \right] \quad (1)$$

Onde:

- \dot{Q} : taxa de transferência de calor;
- \dot{W} : potência de eixo;
- \dot{m} : vazão mássica;
- h : entalpia específica do fluido de trabalho;
- V : velocidade do fluido quando cruza as superfícies de controle;
- g : aceleração da gravidade;
- Z : nível em relação a um referencial, geralmente considera-se o solo.

As letras “e” e “s” referem-se aos pontos de entrada e saída do fluido nas superfícies de controle. Na prática, as variações das energias cinética e potencial podem ser desconsideradas, onde:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_s * h_s - \sum_e \dot{m}_e * h_e \quad (2)$$

A equação 2 é utilizada para calcular a energia térmica que é recebida pelo gerador de vapor ou fornecida pelo condensador, o valor de trabalho realizado pela turbina, a variação da massa que percorre o ciclo e a entalpia do

início e do fim da passagem do fluxo por cada elemento do ciclo.

Um sistema fechado, operando em ciclo, é definido pela equação 3:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (3)$$

A equação 4 demonstra a quantidade de trabalho que é gerado, a partir da diferença entre o calor gerado por uma fonte quente e o calor recebido por uma fonte fria:

$$QH - QL = W \quad (4)$$

Onde:

- QH : calor fornecido para o ciclo a uma temperatura superior TH ;
- QL : calor que é rejeitado pelo ciclo a uma temperatura inferior TL ;
- W : trabalho útil gerado pelo sistema, subtraídas as perdas.

Apesar do Ciclo de Carnot não possuir nenhuma aplicação prática nas máquinas térmicas, através desse ciclo é possível determinar os limites de rendimento máximo para todos os ciclos, através da equação 5 (STUCHI, 2015):

$$\eta = \frac{W}{QH} = \frac{QH - QL}{QH} = 1 - \frac{QL}{QH} \quad (5)$$

Visto que o calor que é trocado no ciclo de Carnot ocorre através de uma temperatura constante (ao longo de uma curva isotérmica), a equação (5) pode ser descrita como:

$$\eta = 1 - \frac{TL}{TH} \quad (6)$$

Já a Segunda Lei da Termodinâmica, pode ser escrita (STUCHI, 2015):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} s \rho dV + \int_{SC} s \rho \vec{V} d\vec{A}r \geq \int_{SC} \frac{1}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{Ar} \right) dAr \quad (7)$$

1º Termo 2º Termo 3º Termo

- ρ : massa específica fluido de trabalho;
- s : entropia do fluido de trabalho;
- T : temperatura absoluta;
- dA e dV : elementos de área e volume;
- VC : *volume de controle*;
- SC : *superfície de controle*;

Em que, o primeiro termo demonstra a variação de entropia no interior do volume de controle. O segundo termo mostra a relação do fluxo de entropia entre a entrada e a saída de massa junto das superfícies de controle. O terceiro termo apresenta a variação da entropia determinada pela transferência de calor entre o fluido e os arredores:

$$\sum_s \dot{m}_s * S_s - \sum_e \dot{m}_e * S_e + \sum \frac{\dot{Q}_0}{T_0} + \dot{\sigma} = 0 \quad (8)$$

- $\dot{\sigma}$: Irreversibilidade

O termo ($\dot{\sigma}$) é incluído na equação para a obtenção da igualdade.

Mediante um método internamente reversível com volume de controle com regiões de entrada e saída únicas, a equação (8) pode ser reescrita como:

$$\frac{\dot{Q}_0}{T_0} = \dot{m}(S_s - S_e) \quad (9)$$

Pode-se escrever a equação (10):

$$\frac{\dot{W}_{disp}}{\dot{m}} = (h_e - h_s) - T_0(S_e - S_s) \quad (10)$$

Onde:

\dot{W}_{disp} = Potência máxima produzida ou potência mínima consumida em processos interna ou externamente reversíveis.

3.2 Ciclo de Carnot

Carnot foi o responsável pela formulação da Segunda Lei Termodinâmica: a primeira lei é a Lei de Joule, onde um sistema não cria energia, apenas a armazena ou transfere como forma de trabalho. Já a segunda lei termodinâmica, mais conhecida como a Lei (ou corolário) de Carnot, define pela relação da conversão de energia térmica em energia mecânica, ou seja, Carnot observou que se o calor pudesse ser transformado em trabalho, ele poderia ser extraído e reutilizado para estabelecer um circuito fechado (JUNIOR, 2009).

3.3 Ciclo de Rankine

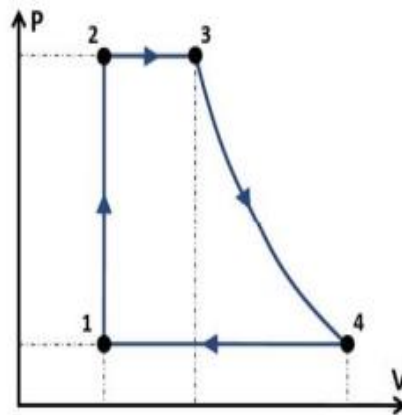
No ano de 1850 William John Macquorn Rankine, professor escocês polímata propôs realizar uma modificação no Ciclo de Carnot (JUNIOR, 2009)

A principal diferença entre o ciclo de Carnot e o ciclo de Rankine está na adição de uma caldeira, e na retirada do condensador no processo isobárico e o processo isotérmico no ciclo de Carnot.

A figura 2 (a) ilustra o Ciclo de Rankine, o fluido saturado sai do condensador (ponto 1), sendo acelerado pela bomba (ponto 2), entrando na caldeira onde é transmitido o calor para ela (ponto 3), ali idealmente sua pressão permanece constante. Posteriormente, a pressão é expandida na turbina, obtendo-se o trabalho mecânico. Portanto, o fluido passa novamente pelo condensador onde retorna ao seu estado inicial. A expansão na turbina é de forma isentrópica também quando ideal, ou seja, a entropia inicial é igual à final.

Entretanto, existem algumas perdas durante o ciclo, ou seja, obtém-se menos trabalho em seu resultado final. Dessa forma, a bomba também não tem uma eficiência máxima de 100%, de forma que precise consumir mais trabalho em seu regime ideal. Contudo, para que o ciclo seja viável, é indispensável a utilização de um dispositivo para que realize o superaquecimento do vapor da caldeira na saída, dessa forma, consegue-se melhorar a qualidade do vapor.

Figura 2- Ciclo Rankine Ideal básico

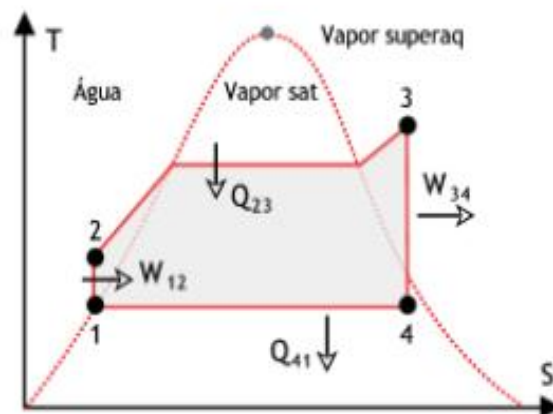


(a) Pressão x Volume

Fonte: Junior,2009

Desta maneira, a figura 3 ilustra como é aplicado o vapor superaquecido na turbina, o ponto '4' é deslocado para a direita, aproximando-se da linha de equilíbrio vapor saturado/vapor superaquecido e reduzindo o teor de água na mesma.

Figura 3 - Diagrama temperatura x Entropia do ciclo Rankine Ideal em uma planta térmica com turbina a vapor

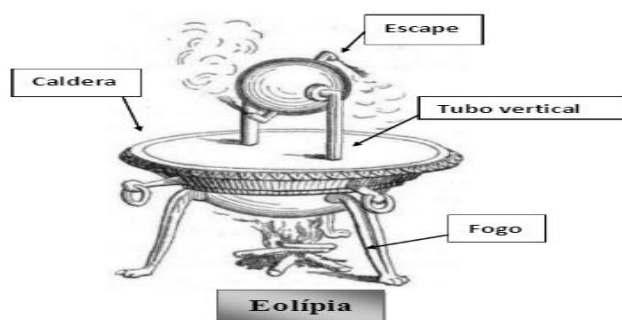


Fonte: Junior,2009

3.4 Funcionamento de uma Termelétrica

Em 1883, foi criada a primeira turbina a vapor construída pelo engenheiro sueco, Carl Gustav de Liva I. Aprimorando a ideia das turbinas, o inventor inglês Parsons, em busca de um motor marinho apropriado para determinada função, desenvolveu a turbina a vapor de reação de vários estágios, em 1895, sobretudo a turbina tinha função de gerar eletricidade ao queimar carvão, pois com a queima do carvão liberando calor, a água em um reservatório se transformava em vapor, e assim impulsiona as turbinas que movimentavam os geradores elétricos, dessa forma a energia elétrica era fornecida para a embarcação (GIL,2010). A figura 4 ilustra o modelo Aeolipile de Hero.

Figura 4 - Aeolipile de Hero



Fonte:Junior,2009

No ano de 1883, foi iniciada a operação da primeira central termelétrica movida a vapor na cidade de Campos (RJ), com uma capacidade de 52 KW (Quilowatt), capacidade para atender apenas lâmpadas na cidade; no mesmo ano, surge a primeira usina hidrelétrica do Brasil, no ribeirão do Inferno, em Diamantina-MG, com capacidade de 12 KW de potência instalada (STUCHI, 2015).

O princípio de funcionamento de uma usina termelétrica dá-se através da conversão da energia térmica em energia mecânica e, conseqüentemente, em energia elétrica.

A conversão da energia térmica em energia mecânica ocorre através de um fluido que passará pelas hélices das turbinas, que exerce um trabalho de expansão nas turbinas térmicas, assim, uma energia mecânica. Já a conversão da energia mecânica em elétrica sucede através do acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina, ou seja, assim que o fluido passar pela turbina, a mesma irá começar o processo de movimentação, acionando assim o gerador

elétrico. (NOGUEIRA et al., 2004). A geração da energia térmica ocorre pela transformação da energia química dos combustíveis, isto é, através do processo da combustão (queima) dos combustíveis utilizados. As usinas termelétricas são especificadas, de acordo com o artifício de combustão empregado.

Temos, então:

a) Combustão externa – O combustível não entra em contato com o fluido utilizado. É o processo mais utilizado nas termelétricas a vapor, em que o combustível usado esquentava a água em uma caldeira, fazendo com que gere um vapor, que ao se expandir dentro da turbina produzirá trabalho mecânico.

b) Combustão interna – é o processo em que ocorre a combustão através da mistura do ar e do combustível em questão. A combustão interna é mais usualmente utilizada nas turbinas a gás e nas máquinas térmicas a pistão (motores Diesel e GN).

Em alguns casos, pode ser usada a cogeração nas termelétricas, isto é, um processo de produção combinado de calor útil e energia elétrica ou até mecânica simultaneamente, pelo processo da queima de um combustível. Esse processo tem um melhor aproveitamento da energia produzida pelo combustível.

A cogeração em uma central termelétrica tem em vista o calor rejeitado pelos ciclos de potência em processos industriais, como o aquecimento de residências e edifícios em determinados países que têm um clima de temperatura baixa. A potência elétrica produzida pelo sistema cogeração pode ser consumida pela própria instalação ou pode ser vendida para uma concessionária de serviço elétrico. (NOGUEIRA et al., 2004).

3.4.1 Termelétrica a vapor

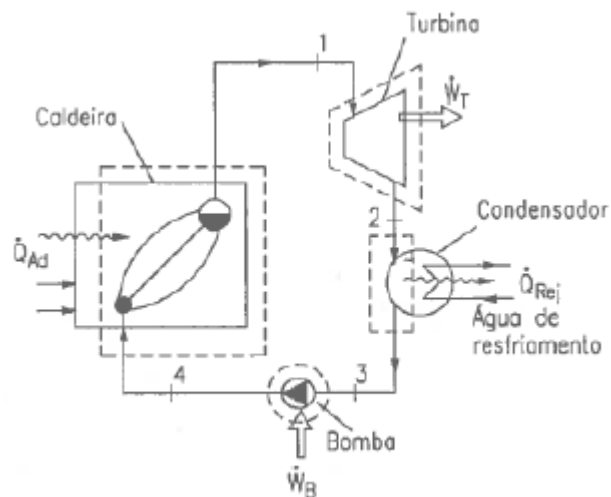
Termelétricas do tipo a vapor utilizam em seu funcionamento uma turbina a vapor como máquina térmica, com o único propósito de gerar energia elétrica. A combustão externa é mais adequada para este tipo de máquina, podendo assim fazer o uso de todos os tipos de combustíveis, renováveis ou não renováveis, como óleo diesel, carvão mineral e biomassa.

O princípio de funcionamento desta máquina se dá através da queima do combustível que gera calor no qual é transferido para a água, onde o mesmo se transforma em forma de vapor e em consequência disso aumenta a pressão e a temperatura na caldeira. Assim, a energia armazenada através do vapor é convertida em energia mecânica, fazendo com que a turbina entre em funcionamento e acione o gerador que, por sua vez, é acoplado à turbina, produzindo assim a energia elétrica.

As termelétricas a vapor apontam uma eficiência entre 42% a 44% em relação a termelétrica a gás (TOLMASQUIM, 2016). Seus rendimentos dependem bastante do tipo de combustível a ser utilizado na queima, pois se caracteriza, principalmente, por alcançar potência unitária elevada, em média 1200 MW (TOLMASQUIM, 2016).

Além de tudo, há uma forma de aumentarmos a eficiência energética do sistema a vapor, que seria o aproveitamento do vapor cedido pela turbina, aplicando-o como calor para um consumidor externo, em regime de cogeração. Conforme a figura 5 ilustra os principais componentes de uma termelétrica a vapor, composta por: Caldeira, Turbina, Condensador e Bomba, que será explicado mais adiante no desenvolvimento do trabalho.

Figura 5 - Esquema e principais componentes de uma termelétrica a vapor



Fonte: Tolmasquim, 2016

3.4.1.1 *Princípio de funcionamento a vapor*

O princípio teórico fundamental básico, no qual é utilizado nas termelétricas, é o Ciclo de Carnot, mas, para as finalidades práticas, o mais aplicado é o Ciclo de Rankine.

A principal função atribuída a uma termelétrica é a geração de eletricidade proveniente da energia que está contida nas fontes de combustíveis. Entretanto, para obter em larga escala grandes quantidades de energia elétrica proveniente de combustíveis fósseis, biomassa ou combustíveis nucleares é fundamental à liberação dessa energia disponível nas fontes energéticas de modo a transferi-la para um gerador elétrico.

3.5 Calor Específico da Água

O calor específico pode ser definido como a quantidade de energia essencial para um elemento sofrer uma variação de temperatura em torno de 1°C. Cada elemento dispõe de um valor de calor específico determinado, usualmente expresso em cal/g°C (GONÇALVES, 2006).

Portanto, quanto maior é o calor específico de um elemento, maior será a troca de calor necessário para que ocorram variações de temperatura.

3.5.1 Valores de calor específico

O quadro 1 traz o valor do calor específico de algumas substâncias de nosso cotidiano.

Quadro 1- Calor específico dos elementos

MATERIAL	CALOR ESPECÍFICO (cal/g.°C)
Acetona	0,52
Areia	0,2
Água	1
Cobre	0,09
Etanol	0,59
Ferro	0,11
Ouro	0,03
Prata	0,05
Alumínio	0,22

Fonte Junior – 2019

3.5.2 Determinação do calor específico (c)

A capacidade térmica de um corpo (C) corresponde à razão entre a quantidade de calor recebida e a variação de temperatura sofrida pelo corpo. Essa grandeza mostra o comportamento dos corpos diante do recebimento de calor. O calor específico de um material é definido como a razão entre a capacidade térmica de um corpo por sua massa expressa na equação 11:

$$c = \frac{C}{m} \quad (11)$$

3.6 Poder calorífico dos combustíveis empregado nas termelétricas PCP, PCV, PCS E PCI

O poder calorífico de um combustível pode apresentar diferentes valores, dependendo da pressão e do volume em análise.

3.6.1 Poder calorífico a pressão constante (PCP)

É a quantidade de calor liberada na combustão de um processo com a pressão constante com um ambiente aberto.

3.6.2 Poder calorífico a volume constante (PCV)

É a quantidade de calor liberada na combustão que se processa a volume constante (ambiente fechado). (RANGEL, 2006).

3.6.3 Poder calorífico superior (PCS)

O PCS é obtido quando os gases da combustão são resfriados até atingir a temperatura ambiente. Ocorre a condensação do vapor de água, e a quantidade de calor medida inclui o calor de condensação da água.

3.6.4 Poder calorífico inferior (PCI)

O PCI é obtido através do valor do poder calorífico superior, a quantidade de calor relativa à condensação do vapor de água. A relação entre PCS e PCI:

$$\text{PCS} - \text{PCI} = q \text{ H}_2\text{O}$$

$$q \text{ H}_2\text{O} = m\text{H}_2\text{O gases} \times L$$

Pode-se escrever

$$\text{PCS} - \text{PCI} = m\text{H}_2\text{O gases} \times L$$

onde

$q \text{ H}_2\text{O}$ = quantidade de calor da água

$m\text{H}_2\text{O}$ = vazão mássica da água

L = calor de condensação da água a 18 °C.

3.6.5 A unidade do poder calorífico

Os combustíveis sólidos e líquidos, o poder calorífico é dado em kcal/kg (unidades métricas) ou BTU / libra (unidades inglesas).

Para combustíveis do estado gasoso, em kcal/m³ (unidades métricas) ou BTU/pe³ (unidades inglesas).

Existe a relação entre as unidades.

1 BTU / libra = 0,555 kcal / kg

1 BTU / pe³ = 8,9 kcal / m³

1 libra = 453 g

1 BTU = 252 cal.

As unidades molares kcal/mol e kcal/kmol:

1 kcal / kmol = 1000 kcal/mol

3.6.6 Determinação do Poder Calorífico

Em laboratório, é feito, com o auxílio de calorímetros, aparelhos adiabáticos que não trocam calor com o ambiente, experimento, o qual obtém calor apenas do combustível testado.

Figura 6- Equipamento calorímetro



Fonte: Directindustry, 2019

O calor gerado pelo combustível é transferido para uma massa de água, cuja temperatura sofre elevação, assim os dados experimentais são coletados e obtém o poder calorífico. Para combustíveis sólidos e líquidos, é utilizado o calorímetro (ou "bomba calorimétrica") de Berthelot-Mahler. (RANGEL, 2006).

3.6.6.1 *Para calcular poder calorífico*

O valor estimado do poder calorífico de um combustível é feito com base na composição química do combustível analisado e nos valores dos calores de cada substância encontrada no combustível.

Quadro 2- Composto químico

COMPOSTO	FORMULA	ESTADO FÍSICO	P.C A 25 °C E PRESSÃO CONSTANTE			
			H ₂ O (liq) e CO ₂ (g)		H ₂ O (vap) e CO ₂ (g)	
			Kcal/mol	Cal/g	Kcal/mol	Cal/g
Hidrogênio	H ₂	Gás	68,32	33,887	57,79	28,669
Carbono (grafite)	C	Sólido	94,05	7,831	-	-
Monóxido de carbono	CO	Gás	67,64	2,415	-	-
Carbono (amorfo)	C	Sólido	96,70	8,083	-	-
Enxofre	S	Sólido	72,00	2,250	-	-
Hidrocarbonetos parafínicos						
Metano	CH ₄	Gás	212,80	13,265	191,76	11,954
Etano	C ₂ H ₆	Gás	372,82	12,399	341,26	11,350
Propano	C ₃ H ₈	Gás	530,60	12,034	488,53	11,079
Propano	C ₃ H ₈	Líquido	526,78	11,947	484,70	10,993
n-butano	C ₄ H ₁₀	Gás	687,98	11,837	635,38	10,932
n-pentano	C ₅ H ₁₂	Gás	845,16	11,715	782,04	10,840
n-pentano	C ₅ H ₁₂	Líquido	838,80	11,626	775,68	10,752
n-hexano	C ₆ H ₁₄	Gás	1.002,635	11,635	928,93	10,780
n-hexano	C ₆ H ₁₄	Líquido	995,01	11,547	921,37	10,692
Alquil benzenos						
Benzeno	C ₆ H ₆	Gás	789,08	10,102	757,52	9,698
Benzeno	C ₆ H ₆	Líquido	780,98	9,998	749,42	9,594
Tolueno	C ₇ H ₈	Gás	943,58	10,241	901,50	9,784
Tolueno	C ₇ H ₈	Líquido	934,50	10,143	892,42	9,686
Monoolefinas						
Etileno	C ₂ H ₄	Gás	337,23	12,022	316,20	11,272
Propileno (propeno)	C ₃ H ₆	Gás	491,98	11,692	460,42	10,942
Acetileno (etino)	C ₂ H ₂	Gás	310,62	11,930	300,10	11,526

Fonte: Plano Nacional de Energia 2030.

Com a composição em massa ou a quantidade de matéria do combustível, é possível determinar a quantidade de calor emitida na combustão de cada fração, somando essa quantidade de calor se terá o valor estimado do poder calorífico.

3.7 Combustíveis Empregados à Termelétrica

Os combustíveis utilizados nas termelétricas podem ser renováveis ou não renováveis. Atualmente, as termelétricas no Brasil consomem a maior parte dos não renováveis, teoricamente são fontes de energias limitadas no planeta, como os combustíveis fósseis (SILVA E COLOMBO, 2016).

- Petróleo
- Carvão mineral
- Gás natural
- Urânio

As fontes de energia renováveis são as que conseguem manter ou ser aproveitadas ao longo do tempo sem possibilidade de esgotamento, como os combustíveis:

- Biomassa
- Etanol
- Biodiesel

Em operação, 16,65% das termelétricas utilizam os combustíveis fósseis; 8,84% fontes biomassa e 1,19% nuclear, de acordo com ANEEL-BIG (01/11/2018). Com base nos dados e ênfase nos combustíveis, o carvão mineral é uma energia não renovável, e, a biomassa é uma energia renovável. O carvão mineral como combustível produz 3.717.830 kW e a biomassa como combustível produz 54 TWh (Ministério de Minas e Energia - MME, 2016).

As termelétricas no Brasil que utilizam os combustíveis não renováveis consomem, em primeiro lugar, derivado do petróleo e, em segundo lugar, o carvão mineral. Em relação aos renováveis, em primeiro lugar, tem-se o bagaço da cana e a palha da cana, que contribuem com 36 TWh, ou 67%, isso significa que eles conseguem gerar mais da metade do valor total de produção, que é de 54TWh. Os

combustíveis que compõem a biomassa são o bagaço e a palha da cana, os resíduos de madeira da produção de celulose, o biogás, a casca de arroz, dentre outros pouco significativos.

Neste presente trabalho, será identificado qual a melhor e a mais utilizada biomassa no Brasil, o bagaço da cana ou a palha da Cana.

3.7.1 O carvão mineral

O carvão mineral tem como principal aplicação a geração de energia elétrica por meio das usinas termelétricas; em segundo plano, vem a aplicação industrial para a geração de calor (energia térmica) utilizada nos processos de produção, como secagem de produtos, de cerâmicas e na fabricação de vidros. Com essas atividades, naturalmente aproveita a cogeração, quando se utiliza o vapor aplicado no processo para a produção de energia elétrica.

O carvão fóssil é a rocha sedimentar combustível, formada a partir de restos vegetais que se encontram em diferentes estados de conservação, por ter sofrido soterramento, seguido de compactação. O carvão fóssil é impropriamente chamado de carvão mineral, já que o carvão mineral tem origem comercial, portanto, não científica, para diferenciar do carvão vegetal, segundo TOLMASQUIM (2016).

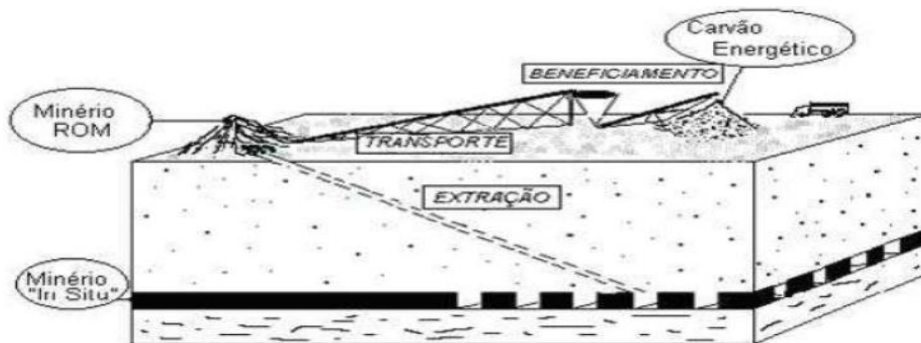
A preparação e a queima do carvão se dão a partir da extração do carvão do solo, fragmentado e armazenado em silos para, posteriormente, ser transportado à usina, onde novamente será armazenado. Em seguida, é transformado em pó, o que permitirá melhor aproveitamento térmico ao ser colocado para queima nas fornalhas de caldeiras. O calor liberado é transferido para a água que circula nos tubos que envolvem a fornalha.

Como ilustrado na figura 7, o processo de mineração do carvão mineral, são segmentados em três operações: Mineração, Beneficiamento e Transporte

- **Mineração:** É uma atividade de extrair minerais da crosta da terra. Segundo Tolmasquim (2016), a mineração pode ser a lavra a céu aberto ou de superfície ou a lavra subterrânea. Mundialmente o carvão mineral é extraído da mineração subterrânea.

- **Beneficiamento:** Consiste em uma série de processos que visam à redução da matéria inorgânica. Com o beneficiamento o minério bruto (ROM) torna-se utilizável não é aproveitável.
- **Transporte:** Após a etapa do beneficiamento do carvão que se localiza próximo aos jazidos, o transporte é realizado principalmente através de correias transportadoras.

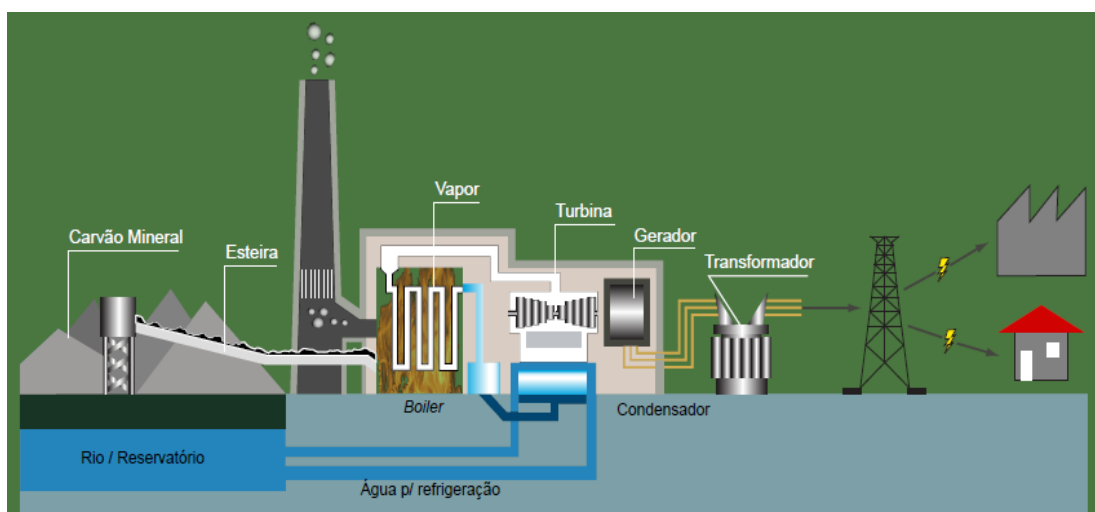
Figura 7 - Processo de mineração do carvão mineral



Fonte: TOLMASQUIM (2016).

A energia térmica (ou calor) contida no vapor é transformada em energia mecânica (ou cinética), que movimentará a turbina do gerador de energia elétrica. Este movimento dá origem à energia elétrica. A figura 8 ilustra o perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral.

Figura 8 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral



Fonte: ANEEL E OMM - Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2008, p. 130.

O carvão mineral é uma fonte de energia com fraco apelo ambiental. Seu ciclo de vida tanto pela extração, quanto pelo processamento, transporte e combustão, quando mal administrado, é associado a potenciais impactos socioambientais (Epstein e outros, 2011).

Com a utilização do carvão como combustível, observa-se impactos ao meio ambiente, tanto na extração quanto na combustão, esses impactos podem afetar os meios edáfico, hídrico e atmosférico, considerado o mais significativo (Michelini, 2004). Para cada determinado combustível é especificado o poder calorífico, ao carvão mineral considerou-se a recuperação de 70% e o poder calorífico de 3900 kcal/kg (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2007)

Em vários países, o carvão tem grande participação na produção de energia elétrica, é o caso da China e dos Estados Unidos que, segundo a IEA-(International Energy Agency), em 2006, produziram mais da metade dos 7.775 terawatts-hora (TWh¹) gerados no mundo. Além disso, países como Alemanha, Polônia, Austrália e África do Sul usam o carvão como base da geração de energia elétrica devido à segurança de suprimento e ao menor custo na comparação com outros combustíveis.

Tanto o carvão vegetal quanto o mineral podem ser usados na indústria (principalmente siderúrgica) ou na produção de energia elétrica, mas, para determinar qual utilizar no processo, não deve ser observada só a disponibilidade de reservas, mas a qualidade do carvão medida pela capacidade de produção de calor, como o poder calorífico expresso em kcal/kg (quilocaloria obtida por quilo do combustível).

O carvão mineral tem algumas variações em seu poder calorífico causado pelas impurezas, o que determina a subdivisão do minério nas categorias baixa e alta qualidade (EPE, 2007). A tabela 1 ilustra as características do carvão brasileiro, e a tabela 2 ilustra as características do carvão internacional.

3.7.1.1 Poder calorífico do carvão mineral

Tabela 1 - Características do Carvão Brasileiro

UF	Mina	Poder Calorífico (Kcal/Kg)	Carbono (%m/m)	Cinzas (%m/m)	Enxofre (%m/m)
PR	Cambuí (sub-betuminoso)	4850	30,0	45,0	6,0
	Sapopema (sub-betuminoso)	4900	30,5	43,5	7,8
SC	Barro Branco (linhito)	2700	21,4	62,1	4,3
	Bonito (linhito)	2800	26,5	58,3	4,7
RS	Candiota (linhito)	3200	23,3	52,5	1,6
	Santa Teresinha (sub-betuminoso)	3800-4300	28,0-30,0	41,0-49,5	0,5-1,9
	Morungava / Chico Lomã (sub-betuminoso)	3700-4500	27,5-30,5	40,0-49,0	0,6-2,0
	Charqueadas (linhito)	2950	24,3	54,0	1,3
	Leão (linhito)	2950	24,1	55,6	1,3
	Iruí (linhito)	3200	23,1	52,0	2,5
	Capané	3100	29,5	52,0	0,8

Nota: Porcentagem de matéria mineral = %mm

Fonte: EPE - Carvão Mineral, 2007

Tabela 2 - Característica do carvão internacional

Propriedades	Austrália	África do Sul	Colômbia	EUA
Poder calorífico (Kcal/Kg)	5370	6760	7000-8000	6378-7728
Umidade (%)	6,9	4,3	2,0-7,0	Nd
Voláteis (%)	24,8	35,3	34,0-39,0	38,1
Carbono (%)	44,3	50,3	Nd	64,2-77,4
Cinzas (%)	24,0	10,1	1,0-6,0	7,5-19,8
Enxofre (%)	0,4	0,7	0,35-1,0	1,0-2,5

Fonte: EPE-Carvão Mineral. Brasília, 2007.

O Poder Calorífico é a quantidade de calor emitida pela combustão da unidade de massa ou volume do combustível utilizado, sendo os gases da combustão resfriados até a temperatura do combustível.

3.7.2 Biomassa

A biomassa é composta pelo material produzido por todos os seres vivos, animais, vegetais, fungos e protistas em seus diferentes processos, portanto a matéria orgânica viva, desde quando fixa energia solar nas moléculas constituintes de suas células, passando por todas as etapas da cadeia alimentar (BRISTOTI E SILVA 1993).

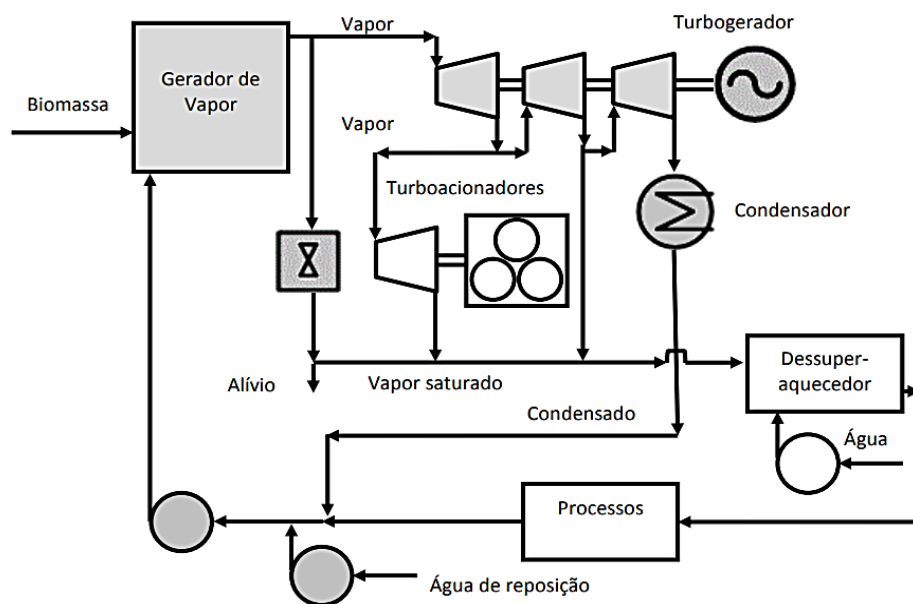
Biomassa é todo material que seja renovável em um período de tempo inferior a 100 anos, a maior parte dos recursos energéticos como o petróleo, carvão mineral não são considerados renováveis, mesmo sendo derivados da vida vegetal. A biomassa pode ser caracterizada, essencialmente, por ser uma matéria carbonada em estado sólido.

A configuração do ciclo vapor adotada nas usinas que utilizam como combustível a biomassa era as com turbinas de contrapressão. Com os aperfeiçoamentos desta configuração foi possível permitir a geração de bioeletricidade (TOLMASQUIM, 2016).

Entretanto, com a introdução da turbina de condensação no ciclo do vapor, foi obtido um maior rendimento na geração elétrica. As configurações que contêm turbinas de condensação com extração permitem que parte do vapor extraído seja direcionada para o processo e o restante seja condensado, otimizando seu aproveitamento energético.

O vapor direcionado para o sistema composto pelo turbogerador e condensador tem a finalidade exclusiva em geração elétrica. Esta configuração é denominada Ciclo Vapor com Condensação e Extração, e é mostrada esquematicamente na figura 9 processo utilizando a biomassa como fonte de energia.

Figura 9- Da Biomassa a Eletricidade



Fonte: Tolmasquim, 2016

3.7.2.1 Palha da cana

Considera-se a palha da cana as folhas secas da cana de açúcar. A palhada ou palha contém um baixo teor de umidade recolhida após a colheita da cana. A palha é formada por folhas verdes, folhas secas e ponteiros da cana-de-açúcar, que são mais utilizados no setor industrial sucroalcooleiro.

Segundo Alves (2011), o bagaço de cana é aproveitado em cerca de 90% na cogeração de energia, enquanto a palha ainda é totalmente desperdiçada.

A palha reflete entre 20% a 30% da cana verde e é semelhante à energia do bagaço. Ela pode ser utilizada como substituição total ou parcial do bagaço, ou ainda pode ser utilizada como seu complemento. (ALVES, 2011).

Segundo ALVES (2011), a palha da cana ao ser cortada apresenta em torno de 42% de umidade, uma semana após o corte sua umidade cai para 27%. Ela apresenta cerca de 140 Kg/Ton em sua matéria seca. A palha separada é utilizada como combustível em usinas que investem na cogeração de energia.

Experimentos realizados em usinas brasileiras comprovaram que, quando se realiza a mistura entre o bagaço e a palha da cana, o índice não ultrapassa os valores de 20% a 25% de eficiência, ou seja, esses índices evidenciam que a palha tem um melhor reaproveitamento no setor agrícola, enquanto que o bagaço da cana já é utilizado como fonte de energia no setor industrial (ALEVES, 2011)

Entretanto, a palha apresenta um alto índice de teores de óxidos em comparação com o bagaço de cana. Então, o uso da palha como combustível em uma termelétrica pode afetar o funcionamento dos equipamentos.

3.7.2.2 *Bagaço de cana*

O bagaço de cana-de-açúcar nada mais é que o último estágio da cana de açúcar, restante da moagem dos colmos. Ele é obtido através do último moinho das usinas e destilarias, constituído de um grupo de partículas de vários tamanhos, que variam entre 1 e 25 mm, representando um tamanho médio de 20 mm, que depende substancialmente do número de moagens realizadas e do tamanho dos equipamentos (SAAD, 2010). O bagaço de cana forma a principal biomassa residual do processamento industrial da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol, e se apresenta como um material constituído por fibras celulósicas moídas, tradicionalmente denominado bagaço.

A maior parte do bagaço produzido é utilizada na própria usina na geração de vapor para o suprimento de energia de seu parque industrial (SILVA; MORAES, 2008). O bagaço de cana *in natura*, resultante do processo de moagem, apresenta aproximadamente umidade de 50% b.u. e densidade aparente de 120 kg/m³ (SILVA; MORAES, 2008).

O colmo da cana-de-açúcar contém a matéria prima básica necessária para a produção de açúcar e etanol, a glicose, e sua obtenção para processamento se faz na moagem, um processo de extração do caldo em que o colmo da cana passa entre dois rolos, com uma pressão pré-estabelecida aplicada a eles. Na moenda, não ocorre só a extração do caldo, mas também a separação da parcela fibrosa do colmo, extraindo açúcares com eficiência que varia de 94% a 97,5%, e produzindo, ao final do processo, um bagaço com umidade em torno de 50% (PNE, 2007).

3.7.2.2.1 Poder calorífico do bagaço de cana de açúcar

Segundo Oliveira, 2014, as biomassas são caracterizadas através de: Poder Calorífico – PC (kJ/kg), densidade (kg/m³) e composição, em que o PC é classificado em:

- Poder Calorífico Superior - PCS: Poder Calorífico em base seca, não leva em consideração o calor que é relacionado à condensação da água, produzido através da reação com o hidrogênio contido na biomassa – bagaço de cana de açúcar.
- Poder Calorífico Inferior (PCI): pode ser calculado subtraindo do PCS o calor relacionado com a condensação do vapor de água que é produzida pela reação do hidrogênio contido na biomassa.

Segundo Oliveira (2014), a energia que está contida no bagaço da cana pode ser avaliada mediante ao poder calorífico, (kJ/kg). O poder calorífico superior ocorre quando a combustão se opera a um volume constante e a água produzida durante a combustão é condensada. Já o poder calorífico inferior é aquele cuja água formada durante a combustão não é condensada (Oliveira, 2014).

Uma forma de obtenção do PCI, segundo Oliveira (2014), é através da fórmula:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 600 (9\text{H}/100) \quad (12)$$

que exclui a interferência do vapor de água produzido na combustão do hidrogênio (H), presente no material em combinação com o oxigênio. A maioria dos sistemas de utilização da biomassa para a produção de energia não seca o material abaixo de 10% de umidade, portanto, o poder calorífico que melhor se aproxima da realidade é o poder calorífico útil (PCU), que é derivado do PCI, levando-se em consideração um dado teor de umidade (u), e segundo Vale et al., (2000), é calculado através da fórmula:

$$\text{PCU} = \text{PCI} [(100 - u)/100] - 6u \quad (13)$$

É importante salientar que o poder calorífico superior depende unicamente da umidade da biomassa em questão e é preciso ser recalculado embasado nos requerimentos de umidade de cada caso, que deverá simulado.

Utilizou-se para o cálculo a equação 14:

$$\%u = (\mu - m_s)100/\mu \quad (14)$$

em que:

m_u = massa (g) de matéria úmida,

m_s = massa (g) de matéria seca

u = umidade (%)

3.8 Modelagem Matemática para Termelétricas

As termelétricas têm como principal estudo as leis fundamentais da Termodinâmica, que podem ser realizadas através de dois modelos matemáticos: o ciclo de Rankine e o ciclo Brayton. Estes modelos analisam cada fase do processo da geração de energia elétrica (MORAN,2009).

Já a modelagem matemática trata das teorias e parâmetros aplicados sobre determinado assunto abordado. O ato de modelar é apresentado em termos da construção de um modelo, traduzido em esquemas explicativos, como uma equação, um sistema de equações ou inequações algébricas, um gráfico ou em forma de tabela.

De acordo com ARAÚJO (2002), a Modelagem Matemática tem como objetivo a resolução de algum problema da realidade, por meio do uso de teorias e conceitos, mas devem ser considerados todos os aspectos que podem sofrer mudanças a partir das perspectivas dos envolvidos. Contudo “se apresentam à medida que se define qual é o objetivo de resolver tal problema, qual é a realidade na qual o problema está inserido, como a matemática é concebida e se relaciona com essa realidade.” (ARAUJO, 2002, p. 20).

Os conceitos analisados para a geração de energia elétrica, a partir de uma termelétrica, envolvem toda a sua estrutura, sistema e processo e assim pode ser determinado um modelo matemático. Alguns dos modelos existentes, como o ciclo de Brayton ou o ciclo de Rankine, têm como finalidade mostrar como se comporta todo o processo de geração de energia nas termelétricas, seja ela a vapor ou a gás.

3.8.1 Eficiência conversão de energia

Segundo ÇENGEL (2013) a eficiência de uma conversão de energia é um termo utilizado na termodinâmica para analisar o grau de sucesso com qual um

processo de transferência ou de conversão de energia é realizado em um sistema. Em geral o desempenho ou eficiência pode ser expresso pela equação (15) que utiliza os termos resultados obtido por fornecimento necessário.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Resultado obtido}}{\text{Fornecimento necessário}} \quad (15)$$

A eficiência de um equipamento que envolve a queima de um combustível se baseia no poder calorífico do combustível, que é a quantidade de calor liberada quando uma quantidade unitária de combustível à temperatura ambiente é completamente queimada e os produtos da combustão são resfriados até a temperatura ambiente. Dessa forma, o desempenho do equipamento de combustão pode ser caracterizado pela eficiência da combustão, definido pela equação (16)

$$\eta_{\text{combustão}} = \frac{\text{Quantidade de calor liberado durante a combustão}}{\text{Poder calorífico do combustível queimado}} \quad (16)$$

Teoricamente uma eficiência de combustão de 100% indica que o combustível é completamente queimado e os gases de combustão que saem da câmara de combustão tem a temperatura ambiente, portanto, a quantidade de calor liberada durante o processo é igual ao poder calorífico do combustível. Como definição de eficiência deve ser claramente definida a base é o poder calorífico superior (PCS) ou inferior (PCI) do combustível.

O gerador é um dispositivo que converte energia mecânica em energia elétrica, a eficiência do gerador se caracteriza pela relação entre a potência elétrica por ele produzida e a potência mecânica a ele entregue como expresso na equação (15).

Em uma termelétrica, a eficiência térmica, em geral, é definida como a razão entre trabalho líquido produzido pelo eixo da turbina e o calor fornecido ao fluido de trabalho (ÇENGEL, 2013).

Em todos os processos podem ocorrer efeitos de outra natureza e são incorporados pela definição de uma eficiência global, para as usinas de potência é adotada a razão entre a potência elétrica produzida e a taxa com a qual energia do combustível é suprida, conforme a equação (17)

$$\eta_{global} = \eta_{combust\tilde{a}o} \cdot \eta_{t\acute{e}rmica} \cdot \eta_{gerador} = \frac{\dot{W}_{liq, eletr}}{PCS_{\dot{x}mliq}} \quad (17)$$

De acordo com ÇENGEL (2013), a eficiência global é de 60% para as grandes usinas geradoras de energia elétrica.

3.8.1.1 Eficiências de dispositivos mecânicos e elétricos

A transferência da energia mecânica é realizada através de um eixo rotativo, portanto, é chamada de trabalho de eixo, assim em uma termelétrica a turbina converte a energia mecânica de um fluido em trabalho de eixo.

Uma turbina ideal, no caso sem atrito, a energia mecânica pode ser convertida totalmente de uma forma mecânica para outra, portanto a eficiência mecânica de um dispositivo é definida como a equação (18).

$$\eta_{mec} = \frac{\text{energia mecânica de saída}}{\text{energia mecânica de entrada}} = \frac{E_{mec, sai}}{E_{mec, ent}} = 1 - \frac{E_{mec, perd}}{E_{mec, ent}} \quad (18)$$

Em sistemas que envolvem o escoamento de fluidos, como em uma turbina, extrai-se a energia mecânica de um fluido, assim na produção de potência mecânica na forma de um eixo rotativo, ao conseguir mover um gerador ou qualquer outro dispositivo rotativo. O grau de perfeição do processo de conversão entre o trabalho mecânico extraído e a energia mecânica do fluido é expresso pela eficiência da turbina, definida como a equação (19).

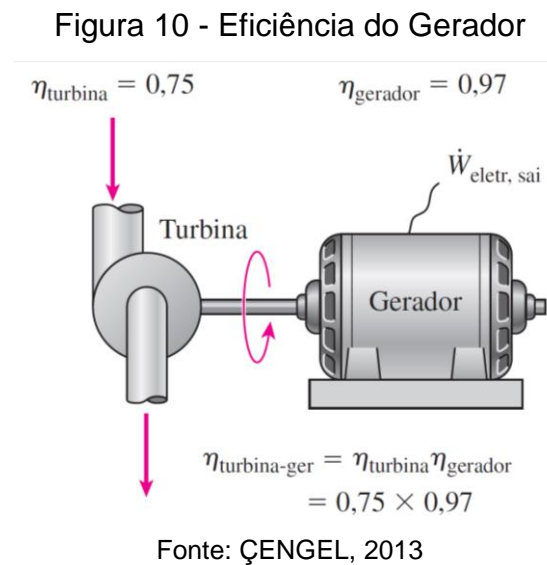
$$\eta_{turbina} = \frac{\text{saída de energia mecânica}}{\text{d\acute{e}cimo de enrgia mecânica do fluido}} = \frac{\dot{W}_{eixo, sai}}{\Delta \dot{E}_{mec, fluido}} = \frac{\dot{W}_{turb}}{\dot{W}_{turb, extr}} \quad (19)$$

A energia elétrica normalmente é convertida em energia mecânica de rotação pelos motores elétricos e a efetividade caracteriza-se pela η motor, ou seja, eficiência do motor, que é a razão entre a potência mecânica produzida pelo motor e a potência elétrica consumida. Motores em plena carga variam a eficiência, cerca de 35% para motores pequenos até 97% para motores maiores de alta eficiência. O

motivo da diferença entre a energia elétrica consumida e a energia mecânica produzida é dissipada sob a forma de calor.

A figura 10 representa a turbina e um gerador, a turbina realiza trabalho no eixo do gerador.

$$\eta_{gerador} = \frac{\text{saída de potencia elétrica}}{\text{entrada de potência mecânica}} = \frac{\dot{W}_{eletr, sai}}{\dot{W}_{eixo, ent}} \quad (20)$$



Com a análise da eficiência da turbina e do gerador, é possível obter a eficiência global, conforme a equação (21)

$$\eta_{turbina - ger} = \eta_{turbina} \eta_{gerador} = \frac{\dot{W}_{eletr, sai}}{\dot{W}_{turbina, extr}} = \frac{\dot{W}_{eletr, sai}}{|\Delta \dot{E}_{mec, fluido}|} \quad (21)$$

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada é de natureza básica, pois é um estudo do tipo bibliográfico. A pesquisa realizada é explicativa, pois ela preocupa-se em identificar fatores que contribuem para a geração mais eficiente de energia elétrica através de termelétricas, comparando-se dois tipos de combustíveis: biomassa a ser definida e carvão mineral. A perspectiva de abordagem é qualitativa, pois exige interpretação

de fenômenos e atribuição de significados das informações e dos resultados de modelagens matemáticas, que serão desenvolvidos para as duas fontes energéticas escolhidas. Já os procedimentos técnicos utilizados, baseiam-se em estudos bibliográficos e documentais, como por exemplo, relatórios da ANEEL, MME, EPE, PNE.

A metodologia deste presente trabalho foi desenvolvida em várias etapas que são apresentadas a seguir, a fim de expor o passo a passo de como ele foi desenvolvido.

- ✓ Realizar pesquisas sobre o funcionamento de uma Termelétrica, utilizando o carvão mineral e a biomassa.
- ✓ . Compreender como funciona uma Termelétrica.
 - Estudo dos Ciclos Térmicos deste processo.
- ✓ Pesquisar qual o combustível mais utilizado nas termelétricas do Brasil.
- ✓ Escolher a biomassa que será comparada com o carvão. Para isso, será necessário:
 - Realizar estudo sobre as fontes de biomassa que podem ser utilizadas nas termelétricas a vapor.
 - Pesquisar qual desses combustíveis (biomassa) é mais utilizado no Brasil.
- ✓ Realizar estudo sobre a biomassa e o carvão.
- ✓ Pesquisar os principais modelos matemáticos existentes para o processo de uma termelétrica.
- ✓ Estudar os modelos matemáticos pesquisados e analisar se esses modelos matemáticos atendem as termelétricas a vapor e as fontes energéticas em questão, carvão e biomassa escolhida.
- ✓ Comparar as etapas de cálculo da eficiência energética do processo produtivo de Energia Elétrica entre as duas fontes de combustíveis.
- ✓ Analisar e indicar um Modelo Matemático que possibilite a comparação de eficiência de um processo produtivo de uma termelétrica a vapor a partir do uso dos combustíveis: biomassa escolhida e carvão mineral.
- ✓ Desenvolver a modelagem matemática com a utilização, inicialmente, do Excel e, com base em pesquisas avançadas, utilizou-se também o Software *Engineering Equation Solver (EES)*.

- ✓ Verificar os impactos sociais, ambientais, econômicos com aplicação da biomassa e do carvão mineral, como combustíveis das termelétricas.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E TÉCNICOS

5.1 Análise Teórica: Pesquisa Exploratória

O presente trabalho é uma pesquisa bibliográfica e exploratória, o desenvolvimento através de uma resolução a ser elaborada por meio das pesquisas. A hipótese deste trabalho é uma resposta provável, suposta e provisória, que têm o papel fundamental de preencher a lacuna do resultado final do trabalho.

Os tipos de biomassa existentes para a geração de energia elétrica a partir de termelétrica a vapor são: o bagaço de cana de açúcar, os resíduos de madeira, o biogás, a casca de arroz, o licor negro, dentre outros. A tabela 3 apresenta as biomassas mais utilizadas no Brasil, conforme já exposto no marco teórico deste projeto. A escolha combustível/biomassa para a comparação com o carvão mineral, foi realizada através dos seguintes critérios:

- ✓ A biomassa, para ser usada em uma termelétrica, tem que ser do tipo a vapor, pois o combustível que será analisado juntamente com a biomassa é o carvão mineral.
- ✓ A biomassa é mais utilizada no Brasil, por ser aquela com maior valor de produção e/ou maior descarte na natureza.

Tabela 3 - Biomassas mais utilizadas no Brasil

Biomassa	Critério 1		Critério 2		Fonte
	Gás	Vapor	% uso	Potencial (KW)	
Bagaço de cana de Açúcar		X	77,73	11.352.402	ANEEL – BIG (2019)
Resíduos de Madeira		X	2,97	434.117	ANEEL – BIG 2019; SILVA (2011)
Biogás	X		0,94	137.735	ANEEL – BIG (2019); ALBARRACIN (2016)
Casca de arroz		X	0,37	53.333	ANEEL – (BIG 2019); LUDWING;9 ARAÚJO; PUTTI (2012)
Licor Negro	X		17,41	2.542.616	ANEEL – BIG (2019) PEDROSO; SILVA; MELO; JUNIOR 2018

Fonte: Desenvolvida pelos Autores

5.2 Ciclo de Rankine Ideal

As plantas de geração termelétrica que utilizam o ciclo Rankine são largamente utilizadas para gerar grandes quantidades de energia elétrica.

Devido à demanda atual de energia elétrica, grande número de centrais termelétricas a vapor foi e está sendo instalada em todo o mundo, visto a experiência e o conhecimento acumulados, a confiabilidade das mesmas é alta e os recursos de manutenção estão amplamente disponíveis. (ÇENGEL, 2013).

Os componentes básicos que completam um ciclo de uma central termelétrica a vapor, com queima de combustíveis fósseis ou biomassa, são:

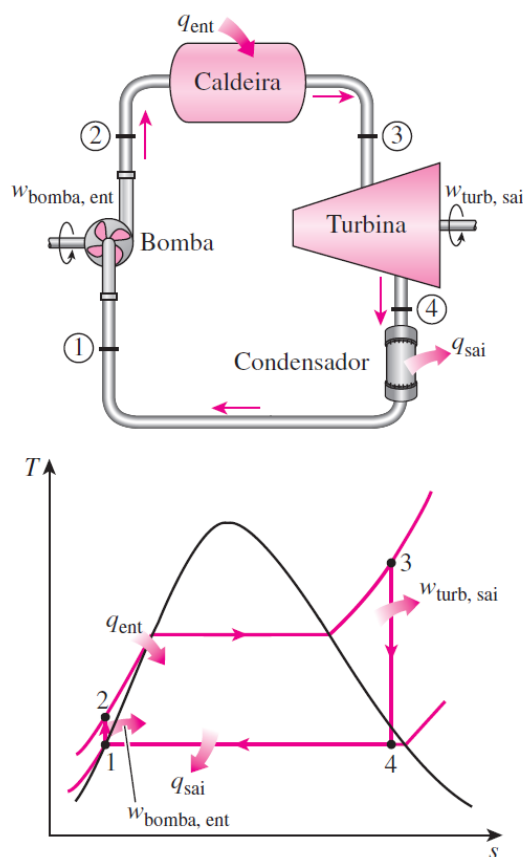
- Caldeira, para produzir vapor;
- Turbina, para acionar o gerador;
- Condensador, para condensar o vapor da turbina;
- Bomba de água de alimentação, para bombear o condensado para a caldeira.

Conforme estes quatro componentes sejam suficientes para produzir energia, existem outros métodos e vários outros itens que podem ser adicionados para

aumentar a eficiência da central termelétrica, como, aquecedores de água, economizadores (pré-aquecedores de água através dos gases da combustão), superaquecedores e pré-aquecedores de ar.

As termelétricas têm como principal estudo as leis Fundamentais da Termodinâmica, a modelagem matemática dos principais componentes utilizados em uma central termelétrica a vapor é o ciclo de Rankine, demonstrados na figura 11 abaixo para os processos de geração de energia elétrica. (ÇENGEL, 2013)

Figura 11- Ciclo de Rankine Simples Ideal



Fonte: ÇENGEL, 2013

Todos os quatro componentes do ciclo de Rankine (Caldeira, Turbina, Condensador e Bomba), são dispositivos com escoamento em regime permanente. Dessa forma as variações de energia cinética e potencial do vapor são pequenas em relação ao trabalho e a transferência de calor, e, em geral são desprezadas.

Portanto, a equação da energia deverá ser aplicada a um dispositivo de

escoamento em regime permanente, por unidade de vapor expressa conforme a Primeira Lei da Termodinâmica a expressão é dada pela equação (22).

$$w_{12} = h_2 - h_1 \quad (22)$$

w_{12} : trabalho que a bomba realiza, unidade J.s/kg.

h : entalpia específica, unidade J/kg.

Pressão constante na caldeira ocorre quando o líquido deixa bomba e sofre um aquecimento até a sua saturação e em seguida sofre evaporação.

Dado pela seguinte equação 23:

$$q_{23} = h_3 - h_2 \quad (23)$$

q_{23} : fluxo de calor específico transferido do sistema para a caldeira, unidade em J.s/kg.

Expansão adiabática reversível na turbina, o vapor produzido pela caldeira possui alta temperatura e uma elevada pressão, portanto o vapor sofre expansão ao entrar pela turbina com o objetivo de produzir trabalho.

Em sequência o vapor que realizou trabalho na turbina circula pelo condensador com uma pressão mais baixa expressa pela equação (24).

$$w_{34} = h_4 - h_3 \quad (24)$$

w_{34} : trabalho que a turbina realiza, unidade em J.s/kg.

Transferência de calor, a pressão constante no condensador, nessa etapa, a transferência de calor do fluido de trabalho é arrefecimento pelo condensador. Dado pela seguinte equação (25):

$$q_{41} = h_4 - h_1 \quad (25)$$

q_{41} : fluxo de calor específico transferido do sistema para o condensador, unidade J.s/kg. (sinal negativo uma vez que esse calor é perdido para o ambiente).

O trabalho total do ciclo é o trabalho da turbina menos o trabalho da bomba, equação (26)

$$w_t = w_{34} - w_{12} \quad (26)$$

W_t : Trabalho líquido do ciclo de Rankine.

O rendimento térmico do ciclo (η) é expresso pela equação (27).

$$\eta = \frac{W_t}{Q_{entr}} \quad (27)$$

Uma das formas de elevar a eficiência é aumentar a pressão de trabalho na caldeira, conseqüentemente na entrada da turbina.

Para centrais termelétrica, que operam com à pressão constante durante o ciclo de Rankine, é possível utilizar do recurso de modificação da potência, por meio do controle de válvulas, assim possibilita a variação de potência pela alteração do escoamento de vapor que produz trabalho na turbina.

5.3 Estudo de Eficiência para cada Componente do ciclo de Rankine

5.3.1 Caldeiras

Conforme a norma regulamentadora (NR-13), “caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo” (NR - 13, 2018). Assim, as caldeiras utilizam a energia química liberada pelo processo de combustão de algum tipo de combustível e provoca a transformação da água do estado líquido para o estado de vapor a uma pressão elevada.

5.3.1.1 Disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho

As caldeiras podem ser de dois tipos distintos, dependendo do tipo de aplicação podem ser:

- a) Flamotubulares.
- b) Aquotubulares.

As caldeiras que utilizam o tipo flamotubulares, ou pirotubulares, os gases circulam pelo interior de tubos imersos em água, um tipo de aplicação geralmente utilizado em aplicações de menor porte.

As caldeiras aquotubulares o processo é inverso, a circulação de água ocorre no interior dos tubos e os gases trocam calor com a água por meio da parede desses tubos majoritariamente por radiação. Este tipo de caldeira aquotubulares é implementado em termelétricas e indústrias que demandam uma grande quantidade de vapor ou que carecem de vapor superaquecido.

5.3.1.2 Força motriz para a circulação do fluido de trabalho

Com a definição da caldeira, pode ser classificado o tipo de circulação do fluido como:

- a) Circulação natural.
- b) Circulação forçada.
- c) Passe único.

Nas caldeiras que possuem tipo de circulação natural, o fluido circula no interior dos tubos graças à diferença de densidade da água líquida e a mistura água-vapor.

Nas caldeiras de circulação forçada são projetadas com paredes de água e apenas um tambor separador. A água é movimentada de forma contínua por bomba. Este tipo de projeto é aplicado em operação até pressões muito próximas à pressão crítica da água.

Nas caldeiras do tipo de processo passe único foram idealizadas para ser utilizada em termelétricas de alta potência. A água circula no sistema apenas uma vez pela tubulação por uma bomba de alimentação, desse modo, não existe a recirculação de água. Em 1923, o inventor tcheco, Mark Benson, realizou a primeira tentativa de aplicar uma caldeira de passe único de forma comercial. Devido a problemas nas tubulações, a caldeira teve que trabalhar com pressões abaixo da pressão crítica do vapor. A empresa Siemens obteve os direitos comerciais e desenvolveu a tecnologia Benson de caldeiras. De acordo com Frank e Wittchow (1997), a tecnologia Benson de caldeiras é a mais compatível para centrais termelétricas que utilizam carvão mineral como combustível.

5.3.1.3 *Nível de pressão de operação*

As caldeiras possuem pressões de trabalho diferentes e podem ser classificadas como:

- a) Caldeiras de vapor de baixa e média pressão (<10 MPa): normalmente são do tipo industrial.
- b) Caldeiras de vapor de alta pressão (10-16 MPa): empregadas em termelétricas e com circulação natural.
- c) Caldeiras de vapor de pressão super alta (>17 MPa): empregadas em termelétricas e com circulação forçada.
- d) Caldeiras de vapor de pressão supercrítica (>22,1 MPa): empregadas em termelétricas planejadas para operar em passe único.
- e) Caldeiras de vapor com pressão deslizante: A operação em pressão deslizante pode ser entendida como o processo de operar com cargas parciais em uma pressão de vapor mais baixa do que a nominal. Esta prática visa diminuir as perdas que ocorrem nas válvulas de admissão da turbina quando se trabalha com cargas parciais.

5.3.1.4 *Tipo de combustível ou fonte de calor*

O tipo de combustível utilizado em uma caldeira é definido segundo o tipo de fornalha implementado na termelétrica, o combustível pode ser dos tipos:

- a) Sólidos: carvão mineral, biomassa.
- b) Líquidos: óleo combustível e óleo diesel.
- c) Gasoso: gás natural, gás de processo e calor residual.

O tipo de combustível a ser utilizado em uma termelétrica irá definir os aspectos construtivos da fornalha, portanto uma caldeira concebida para a utilização de óleo combustível ou gás não deve aplicada para a queima de carvão sem antes sofrer algumas alterações (NR - 13, 2018).

5.3.1.5 Tecnologia de combustão

É definida a tecnologia de queima da caldeira pelo tipo de combustível utilizado, pode ser classificada como (NR - 13, 2018):

- a) De grelha fixa e ou grelha rotativa: empregada na queima de biomassa ou de resíduos agroindústrias em caldeiras de pequeno porte.
- b) De queima em suspensão: empregada na queima de combustível sólido pulverizado, óleo combustível ou gás natural.
- c) Leito fluidizado (borbulhante ou circulante): empregado na queima de combustíveis sólidos.

5.3.1.6 Medida do calor de reação

O calor liberado ou absorvido por um sistema que sofre uma reação química é determinado em aparelhos chamados calorímetros. Estes variam em detalhes e são adaptados para cada tipo de reação que se quer medir o calor. O calorímetro é composto por um recipiente com paredes adiabáticas, contendo uma massa conhecida de parede água, onde se introduz um sistema em reação. O recipiente contém um agitador, um termômetro que mede a variação de temperatura ocorrida durante a reação (FELTRE, 2004).

A expressão que determina o calor liberado ou absorvido em uma reação química é expressa:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \tag{28}$$

Essa equação define a quantidade de calor (Q) que um corpo de massa (m) e calor específico (c) absorve ou libera para variar sua temperatura em certo valor (ΔT).

5.3.2 Turbinas

A turbina a vapor é uma máquina térmica rotativa na qual a energia térmica do vapor é transformada em energia cinética devido à sua expansão através dos bocais. Esta energia cinética tende a provocar movimento no eixo da turbina, gerando energia mecânica que pode ser utilizada para acionamentos de equipamentos como compressores, ventiladores e bombas; já para geração de energia, aciona um gerador síncrono (JUNIOR, 2009).

Uma grande vantagem das turbinas a vapor é a possibilidade da utilização da energia térmica do vapor em processos industriais através de extrações reguláveis na sua seção de fluxo após o aproveitamento de parte deste potencial térmico do vapor para geração de energia mecânica no eixo. Ou seja, a turbina a vapor pode ser utilizada como geradora de energia térmica e mecânica (ou elétrica quando o acionamento for de gerador síncrono) simultaneamente, o que caracteriza o processo de cogeração.

O princípio de funcionamento de uma turbina a vapor baseia-se na atuação do vapor através de um injetor sobre as palhetas móveis fixadas ao eixo da turbina.

A construção de uma turbina a vapor é semelhante à de um gerador elétrico, pois é constituída basicamente de um estator e de um rotor. Onde o estator é a parte fixa da máquina e o rotor é a parte móvel que é o responsável pela transmissão da energia mecânica gerada ao gerador (JUNIOR, 2009).

A expansão do vapor dentro da turbina é de multi estágios, pois as palhetas dos primeiros estágios possuem dimensões menores em relação às palhetas dos últimos estágios, visto que a entrada da turbina se concentra na alta pressão, na temperatura e no volume específico reduzido do vapor. À medida que o vapor passa por entre os estágios, há uma perda de pressão e de temperatura que acarreta em uma elevação do volume específico do vapor, em consequência disso, as palhetas dos últimos estágios são maiores que da entrada da turbina.

5.3.2.1 Potência mecânica da turbina

O processo de compressão de vapor pela válvula governadora é considerado como uma expansão adiabática ideal, de modo que seja desprezível a variação de entalpia. Desconsiderando também a existência de perdas de calor ou mudança de pressão na câmara de vapor, assim, a entalpia do vapor na câmara de vapor é considerada igual à entalpia do vapor na saída do superaquecedor secundário.

O vapor que sai da câmara de vapor passa através dos estágios da turbina, onde sofre uma expansão isentrópica. Dessa forma, o processo de expansão de vapor é adiabático e descrito em termos da eficiência isentrópica. (JUNIOR, 2009):

5.3.3 Turbinas – Gerador

O gerador é a máquina responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica. Esta conversão se dá através da interação eletromagnética entre as bobinas do rotor e do estator do gerador.

O rotor é o elemento móvel, que é acoplado mecanicamente ao eixo da turbina através do redutor. Já o estator ou armadura é componente fixo, montado na carcaça do gerador. No estator, é induzida a tensão elétrica por meio de um campo criado no rotor.

Os geradores empregados em termelétricas são do tipo síncrono trifásico, ou seja, a rotação de operação está diretamente relacionada ao número de polos magnéticos e a frequência, como mostra a equação a seguir.

$$y = \frac{f}{p} \tag{29}$$

Onde:

y=rotação do eixo[rps]

f = frequência [Hz]

p=par de polos magnéticos

5.3.4 Condensadores

O condensador é um trocador de calor onde se realiza a conversão do vapor de exaustão da turbina e retorna ao estado líquido, com o intuito de se reutilizar a água no ciclo de Rankine para a alimentação da caldeira.

Para manter um nível adequado de vácuo no condensador, é necessário remover constantemente os gases não condensáveis. Para isto, são utilizados ejetores que operam com vapor.

O vapor de exaustão da turbina entra no condensador e, a partir daí, ocorre a condensação, quando o vapor entra em contato com as paredes do condensador, é resfriado pela água que circula no interior do mesmo com o auxílio de uma bomba. Esta água é proveniente de uma torre de resfriamento. Não há contato algum do vapor com a água de resfriamento.

O líquido condensado é coletado em um poço montado na parte inferior do feixe tubular e possui volume suficiente para garantir a operação adequada das bombas de condensado.

5.4 Programa Engineering Equation Solver (EES)

Durante pesquisas realizadas no livro de (Çengel, 2013), foi descoberta a aplicação do software EES (*Engineering Equation Solver*) como ferramenta de ensino em auxílio na elaboração de simulações da comparação dos dois combustíveis. Tal ferramenta demonstra a otimização, análise paramétrica, regressão linear e não linear, além de apresentar gráficos com maior qualidade.

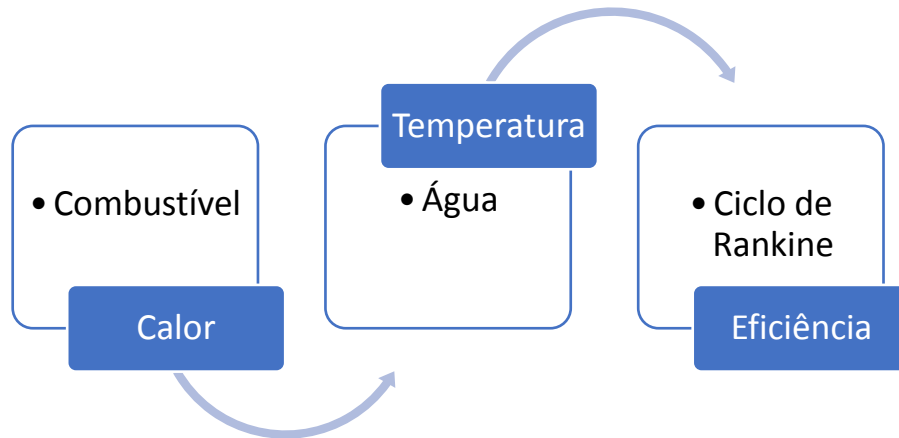
O programa EES é um solucionador de equações com funções e tabelas de propriedades termodinâmicas e de transporte incluídas, no entanto auxiliou a realizar análises de sensibilidade das variáveis de projeto, e visualização do comportamento das funções de transferência através de gráficos e de determinação de limites operacionais para o dimensionamento do sistema.

Assim, para a realização da modelagem matemática deste trabalho através do ciclo de Rankine simples e ideal, foi utilizado o programa EES, com finalidade de apresentar gráficos, equações e tabelas que foram desenvolvidos no programa.

5.5 Modelagem Matemática - Carvão Mineral x Bagaço de Cana

A tabela, anexo A, apresenta o poder calorífico inferior dos combustíveis que são utilizados em uma termelétrica. Os dados foram retirados do site de uma empresa, cujo nome é ARAUTERM, que disponibiliza tabelas técnicas para realização de cálculos matemáticos. Os valores PCI do bagaço de cana e carvão mineral serão utilizados durante os cálculos no programa de software EES. A figura 12 representa o fluxograma da modelagem matemática desenvolvida.

Figura 12 - Fluxograma da modelagem matemática desenvolvida



Fonte: Desenvolvido pelos autores, 2019

Para a analogia da eficiência do ciclo de Rankine foram utilizados dois combustíveis distintos como carvão mineral (não renovável) e o bagaço de cana de açúcar (renovável), o fluxograma acima ilustra como a modelagem matemática foi desenvolvida.

Alguns parâmetros foram fixados para a analogia como, vazão mássica do combustível e massa da água (na caldeira).

Quadro 3 - Parâmetros utilizados para a analogia

Combustível carvão mineral	Bagaço da cana de açúcar (20% de água)
PCI = 4.500 Kcal/kg	PCI = 3.200 Kcal/kg
Vazão mássica do combustível = 5 Kg/h	Vazão mássica do combustível = 5 Kg/h
Temperatura transmitida = 225 °C	Temperatura transferido = 190 °C
Massa da água = 100 kg	Massa da água = 100 kg

Fonte: Desenvolvida pelos Autores, 2019

Com o software EES o resultado da temperatura transferida do combustível para a água da caldeira, através da linguagem de programação do software as fórmulas e os resultados, como calor gerado pelo combustível e temperatura transferida.

5.5.1 Simulação utilizando o combustível Carvão Mineral

A linguagem de programação utilizada no software foi Java Script e figura (13) representa parte da programação.

Figura 13 - Linguagem de programação-carvão mineral

```
{CALOR DO COMBUSTIVEL}

pci=4500 [Kcal/kg];
m_massica=5[Kg/h];
pci*m_massica=q_calor;

{TEMPERATURA TRANSFERIDA}

m_massa=100[Kg];
c_calor_especifico=1[cal/g.°C];
ti_temperatura_ambiente=30[°C];

(q_calor/(m_massa*c_calor_especifico))+ti_temperatura_ambiente=tf_temperatura_transferida
```

Fonte: Desenvolvido pelos autores, 2019

As equações utilizadas para encontrar o calor do combustível:

$$pci = 4500 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\dot{m}_{mássica} = 5 \text{ Kg/h}$$

$$pci \times \dot{m}_{mássica} = q_{calor}$$

PCI: poder calorífico inferior

$\dot{m}_{mássica}$: vazão mássica do combustível

q_{calor} : calor do combustível

O calor do carvão mineral gerado é 22.500 cal com a vazão mássica constante de 5 Kg/h.

$$m_{massa} = 100 \text{ Kg}$$

$$c_{calor \text{ específico}} = \frac{1 \text{ cal}}{g} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{i \text{ temperatura ambiente}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{q_{calor}}{m_{massa} \times c_{calor \text{ específico}}} + t_{i \text{ temperatura ambiente}} = t_{f \text{ temperatura transferida}}$$

$$t_{f \text{ temperatura transferida}} = \mathbf{225^\circ\text{C}}$$

m_{massa} : massa da água

$c_{calor \text{ específico}}$: calor específico da água

t_i : temperatura inicial

t_f : temperatura final

A temperatura final transferida para a água pelo combustível carvão mineral é 225°C, transformando água em vapor.

5.5.2 Simulação, utilizando o combustível Bagaço de Cana de Açúcar:

Figura 14 - Linguagem de programação-bagaço de cana

```
{CALOR DO COMBUSTIVEL}

pci=3200 [Kcal/kg];
m_massica=5[Kg/h];
pci*m_massica=q_calor;

{TEMPERATURA TRANSFERIDA}

m_massa=100[Kg];
c_calor_especifico=1[cal/g.°C];
ti_temperatura_ambiente=30[°C];

(q_calor/(m_massa*c_calor_especifico))+ti_temperatura_ambiente=tf_temperatura_transferida
```

Fonte: Desenvolvido pelos autores, 2019

Repetindo as fórmulas para obter o calor do combustível bagaço de cana, usando o PCI do bagaço:

$$pci = 3200 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\dot{m}_{mássica} = 5 \text{ Kg/h}$$

$$pci \times \dot{m}_{mássica} = q_{calor}$$

PCI: poder calorífico inferior

$\dot{m}_{mássica}$: vazão mássica do combustível

q_{calor} : calor do combustível

O calor do bagaço de cana gerado é 16.000 cal com a vazão mássica constante de 5 Kg/h.

$$m_{massa} = 100 \text{ Kg}$$

$$c_{calor\ específico} = \frac{1\text{cal}}{g} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{i\text{temperatura ambiente}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{q_{calor}}{m_{massa} \times c_{calor\ específico}} + t_{i\text{temperatura ambiente}} = t_{f\text{temperatura transferida}}$$

$$t_{f\text{temperatura transferida}} = \mathbf{190 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

m_{massa} : massa da água

$c_{calor\ específico}$: calor específico da água

t_i : temperatura inicial

t_f : temperatura final

A temperatura final transferida para a água pelo combustível bagaço de cana foi 190°C, transformando água em vapor.

O resultado da temperatura transferida para água foi de 190°C, como informado na figura 18.

Tabela 4 - Resultados obtidos na simulação

	Vazão mássica (Kg/h)	PCI (Kcal/Kg)	Calor (cal)	Temperatura (°C)	Pressão Constante (KPa)
Carvão mineral	5	4.500	22.500	225	300
Bagaço de cana	5	3.200	16.000	190	300

Fonte: Desenvolvida pelos autores, 2019

Com o resultado de temperatura transferido de cada combustível foi aplicado o ciclo de Rankine para analisar a eficiência de cada combustível.

5.5.3 Modelagem do Ciclo de Rankine - carvão mineral

Figura 15- Programação do ciclo de Rankine

```

P_caldeira=300; {kPa}
P_condensador=75; {kPa}

{caldeira(saída)}
P_1=P_caldeira;
T_1=225; {°C}
h_1=Enthalpy(Water;T=T_1;P=P_1)
s_1=Entropy(Water;T=T_1;P=P_1)

{turbina(saída)}
P_2=P_condensador;
s_2=s_1;
s_l2=Entropy(Water;x=0;P=P_2)
s_lv2=Entropy(Water;x=1;P=P_2)
s_lv2=s_v2-s_l2;
x_2=(s_2-s_l2)/s_lv2;
h_l2=Enthalpy(Water;x=0;P=P_2)
h_v2=Enthalpy(Water;x=1;P=P_2)
h_lv2=h_v2-h_l2;
h_2=h_l2+(x_2*h_lv2)

{condensador(saída)}
P_3=P_condensador;
X_3=0;
h_3=Enthalpy(Water;x=0;P=P_3)
v_3=1/Density(Water;x=0;P=P_3)
s_3=Entropy(Water;x=0;P=P_3)

{bomba(saída)}
P_4=P_caldeira;
w_bomba=v_3*(P_4-P_3);
h_4=w_bomba+h_3;

{calores e trabalhos}
q_caldeira=h_1-h_4;
w_turbina=h_1-h_2;
w_liquido=w_turbina-w_bomba;

{rendimento}
n_eficiencia =(w_liquido/q_caldeira)*100;

```

Fonte: Desenvolvida pelos Autores, 2019

As equações, a seguir, foram inseridas no EES - ciclo de Rankine ideal. A pressão da caldeira e do condensador para a analogia dos combustíveis foi mantido constante.

5.5.3.1 Ciclo de Rankine utilizando temperatura final do combustível carvão mineral

$$P_{caldeira} = 300 \text{ KPa}$$

$$P_{condensador} = 75 \text{ KPa}$$

$$P_1 = P_{caldeira}$$

$$T_1 = 225 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = h(\text{'water'}; T = T_1; P = P_1)$$

$$s_1 = s(\text{'water'}; T = T_1; P = P_1)$$

$$P_2 = P_{condensador}$$

$$s_2 = s_1$$

$$s_{l2} = s(\text{'water'}; x = 0; P = P_2)$$

$$s_{lv2} = s(\text{'water'}; x = 1; P = P_2)$$

$$s_{lv2} = (P_{v2} - P_{l2})$$

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{l2}}{s_{lv2}}$$

$$h_{l2} = h(\text{'water'}; x = 0; P = P_2)$$

$$h_{v2} = h(\text{'water'}; x = 1; P = P_2)$$

$$h_{lv2} = (h_{v2} - h_{l2})$$

$$h_2 = h_{l2} + x_2 \times h_{lv2}$$

$$P_3 = P_{condensador}$$

$$x_3 = 0$$

$$h_3 = h(\text{'water'}; x = 0; P = P_3)$$

$$v_3 = \frac{1}{p(\text{'water'}; x = 0; P = P_3)}$$

$$s_3 = s(\text{'water'}; x = 0; P = P_3)$$

$$P_4 = P_{caldeira}$$

$$W_{bomba} = v_3 \times (P_4 - P_3)$$

$$h_4 = W_{bomba} + h_3$$

$$q_{caldeira} = h_1 - h_4$$

$$W_{turbina} = h_1 - h_2$$

$$W_{líquido} = W_{turbina} - W_{bomba}$$

$$\eta_{eficiência} = \frac{W_{líquido}}{q_{caldeira}} \times 100$$

O software possui tabela da termodinâmica que ajudou nos cálculos, como a entalpia e entropia da água, como visto nas fórmulas do ciclo de Rankine ideal.

Figura 16 - Resultados do Ciclo de Rankine - Carvão Mineral

```

h1 = 2916 [kJ/kg]
h2 = 2280
h3 = 384,3 [kJ/kg]
h4 = 384,6
h12 = 384,3 [kJ/kg]
hlv2 = 2278
hv2 = 2662 [kJ/kg]
neficiencia = 25,13
P1 = 300
P2 = 75
P3 = 75
P4 = 300
Pcaldeira = 300
Pcondensador = 75
qcaldeira = 2532
s1 = 7,416 [kJ/kg-K]
s2 = 7,416
s3 = 1,213 [kJ/kg-K]
s12 = 1,213 [kJ/kg-K]
slv2 = 7,456 [kJ/kg-K]
sv2 = 8,669
T1 = 225
v3 = 0,001037
wbomba = 0,2334
wliquido = 636,3
wturbina = 636,5
x2 = 0,832
x3 = 0

```

Calculation time = ,0 sec

Fonte: Desenvolvida pelos Autores, 2019

Aplicando a temperatura transferida (225°C) pelo combustível carvão mineral no ciclo de Rankine, o resultado da eficiência foi de 25,13%, com uma pressão constante na caldeira e no condensador.

5.5.4 Modelagem do Ciclo de Rankine – bagaço de cana

$$P_{caldeira} = 300 \text{ KPa}$$

$$P_{condensador} = 75 \text{ KPa}$$

$$P_1 = P_{caldeira}$$

$$T_1 = 190 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = h(\text{'water'}; T = T_1; P = P_1)$$

$$s_1 = s(\text{'water'}; T = T_1; P = P_1)$$

$$P_2 = P_{condensador}$$

$$s_2 = s_1$$

$$s_{l2} = s(\text{'water'}; x = 0; P = P_2)$$

$$s_{lv2} = s(\text{'water'}; x = 1; P = P_2)$$

$$s_{lv2} = (P_{v2} - P_{l2})$$

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{l2}}{s_{lv2}}$$

$$h_{l2} = h(\text{'water'}; x = 0; P = P_2)$$

$$h_{v2} = h(\text{'water'}; x = 1; P = P_2)$$

$$h_{lv2} = (h_{v2} - h_{l2})$$

$$h_2 = h_{l2} + x_2 \times h_{lv2}$$

$$P_3 = P_{condensador}$$

$$x_3 = 0$$

$$h_3 = h(\text{'water'}; x = 0; P = P_3)$$

$$v_3 = \frac{1}{p(\text{'water'}; x = 0; P = P_3)}$$

$$s_3 = s(\text{'water'}; x = 0; P = P_3)$$

$$P_4 = P_{caldeira}$$

$$W_{bomba} = v_3 \times (P_4 - P_3)$$

$$h_4 = W_{bomba} + h_3$$

$$q_{caldeira} = h_1 - h_4$$

$$W_{turbina} = h_1 - h_2$$

$$W_{líquido} = W_{turbina} - W_{bomba}$$

$$\eta_{eficiência} = \frac{W_{líquido}}{q_{caldeira}} \times 100$$

Figura 17 - Resultados ciclo de Rankine - bagaço de cana

$h_1 = 2845$ [kJ/kg]
 $h_2 = 2234$
 $h_3 = 384,3$ [kJ/kg]
 $h_4 = 384,6$
 $h_{12} = 384,3$ [kJ/kg]
 $h_{1v2} = 2278$
 $h_{v2} = 2662$ [kJ/kg]
 $\eta_{\text{eficiencia}} = 24,8$
 $P_1 = 300$
 $P_2 = 75$
 $P_3 = 75$
 $P_4 = 300$
 $P_{\text{caldeira}} = 300$
 $P_{\text{condensador}} = 75$
 $q_{\text{caldeira}} = 2460$
 $s_1 = 7,267$ [kJ/kg-K]
 $s_2 = 7,267$
 $s_3 = 1,213$ [kJ/kg-K]
 $s_{12} = 1,213$ [kJ/kg-K]
 $s_{1v2} = 7,456$ [kJ/kg-K]
 $s_{v2} = 8,669$
 $T_1 = 190$
 $v_3 = 0,001037$
 $w_{\text{bomba}} = 0,2334$
 $w_{\text{liquido}} = 610,2$
 $w_{\text{turbina}} = 610,4$
 $x_2 = 0,812$
 $x_3 = 0$

Calculation time = ,0 sec

Utilizando o mesmo ciclo de Rankine com os dados do combustível bagaço de cana, o resultado gerado foi de 24,8% de eficiência menor, pois a temperatura transferida do combustível bagaço de cana foi de 190°C.

A eficiência do ciclo de Rankine foram diferentes para cada combustível analisado.

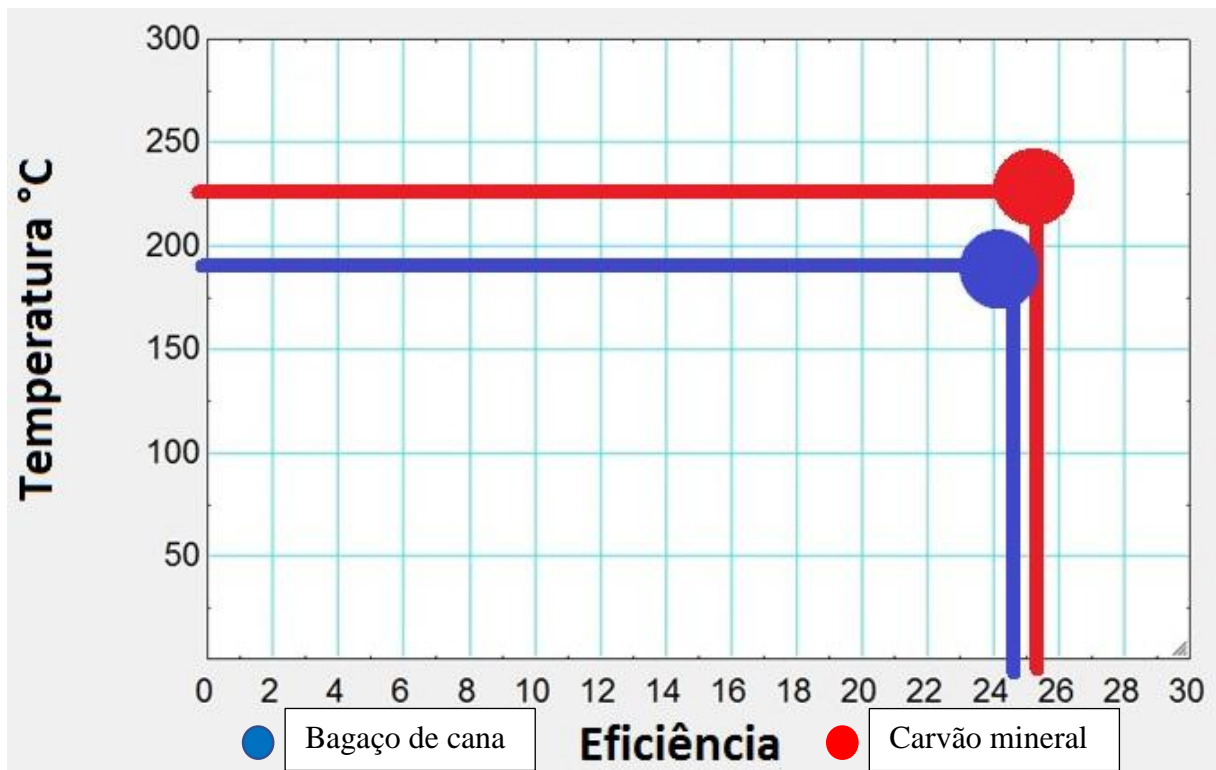
Quadro 4 - Eficiência do Ciclo de Rankine

Combustível	Eficiência(η)
Carvão mineral	25,13%
Bagaço de cana	24,8%

Fonte: Desenvolvida pelos Autores, 2019

A representação gráfica da eficiência dos dois combustíveis mostra a relação de temperatura com a eficiência.

Figura 18- Representação gráfica da eficiência dos dois Combustíveis



Fonte: Desenvolvida pelos Autores, 2019

6 CONCLUSÃO

O software EES utilizado para realizar a analogia dos combustíveis é um programa geral de resolução de equações, que pode resolver numericamente milhares de equações algébricas e diferenciais não-lineares acoplados. Uma característica importante do EES, e que favoreceu os resultados, é o banco de dados termodinâmico e de propriedade de transporte de alta precisão que é fornecido para centenas de substâncias, de uma maneira que permite que ele seja usado com a capacidade de resolver equações, a substância tratada no trabalho foi a água.

O ciclo de Rankine pode ter uma boa eficiência, variando a temperatura e a pressão de trabalho do ciclo, o objetivo do trabalho foi a análise de fonte de energia (combustível) que transmite calor para a água, assim realizando trabalho na turbina em forma de vapor, a análise foi baseada na temperatura e estado de agitação das partículas de um corpo, a pressão foi mantida fixa.

Com o resultado da eficiência do ciclo de Rankine, adquirido por meio do software, conseguiu-se concluir que o combustível bagaço da cana de açúcar tem eficiência inferior comparado ao carvão mineral, por causa do poder calorífico inferior do bagaço da cana por ser menor (3.200 Kcal/kg) que o carvão mineral, que possui um PCI de 4.500 Kcal/kg.

A diferença entre as eficiências dos combustíveis analisados é pequena 0,33%; a diferença é bem considerável na temperatura, o carvão mineral com a temperatura de 225 °C e o bagaço de cana com temperatura de 190 °C, com a vazão mássica a mesma para os dois combustíveis 5Kg/h.

Acreditamos que a diferença de 0,33% da eficiência do ciclo de Rankine dos dois combustíveis não seja tão impactante na produção de energia elétrica, levando-se em conta a sustentabilidade e os seus pilares econômico, social e ambiental. Vale refletir se os 0,33% de eficiência vale todo o impacto ambiental causado pela mineração do carvão mineral.

ANEXO A – Poder Calorífico Inferior dos Combustíveis

COMBUSTÍVEL	PCI	COMBUSTÍVEL	PCI	COMBUSTÍVEL	PCI
Alcool de cana	5.500 kcal/l	Coque de lenha	7.600 kcal/kg	Óleo de algodão	8.050 kcal/l
Aparas vinho	6.300 kcal/kg	Coque metalúrgico	7.200 kcal/kg	Óleo de amendoin	8.000 kcal/l
Bagaço de cana (20% ÁGUA)	3.200 kcal/kg	Fibras de palmeira (48% de água)	2.000 kcal/kg	Óleo de babaçu	7.770 kcal/l
Bagaço de cana (50% ÁGUA)	1.800 kcal/kg	Fibras de palmito	3.800 kcal/kg	Óleo de soja	8.125 kcal/l
Bambú (10% água)	3.700 kcal/kg	Filme polietileno	5.600 kcal/kg	Óleo diesel	8.620 kcal/l
Borra de café	1.570 kcal/kg	Gás de água	4.000 kcal/Nm ³	Palha de amendoin (12% água)	3.100 kcal/kg
Carvão de babaçu	7.000 kcal/kg	Gás de água carburado	6.000 kcal/Nm ³	Palha de trigo (20% ÁGUA)	3.200 kcal/kg
Carvão mineral - Cambul/PR	6.200 kcal/kg	Gás de alto forno	700 kcal/Nm ³	Papel	4.200 kcal/kg
Carvão mineral - Charqueadas/ RS	3.100 kcal/kg	Gás de biodigestor (biogás)	5.000 kcal/Nm ³	Piche alcatrão	8.600 kcal/kg
Carvão mineral - Mina do Leão/ RS	4.200 kcal/kg	Gás de coqueira	4.300 kcal/Nm ³	Pó de linho	4.000 kcal/kg
Carvão mineral - Tubarão/ SC	4.500 kcal/kg	Gás de gasogênio	1.260 kcal/Nm ³	Pó de madeira fino (seco)	4.000 kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 kcal/kg	Gás de nafta	4.220 kcal/Nm ³	Pó de madeira grosso (seco)	4.200 kcal/kg
Casca de árvore	2.200 kcal/kg	Gás GLP (50%)	11.025 kcal/kg	Pó de tabaco	2.300 kcal/kg
Casca de algodão	3.000 kcal/kg	Gás natural	9.065 kcal/Nm ³	Querosena	8.300 kcal/l
Casca de amêndoa dende	4.800 kcal/kg	Lascas de madeira	3.300 kcal/kg	Recortes de couro (14% ÁGUA)	4.400 kcal/kg
Casca de arroz (12% água)	3.300 kcal/kg	Lenha (40% água)	2.400 kcal/kg	Resíduos de juta	3.800 kcal/kg
Casca de babaçu	4.000 kcal/kg	Lenha (seca) (12% água)	3.680 kcal/kg	Restos de borracha	4.000 kcal/kg
Casca de cacau (8% água)	3.900 kcal/kg	Madeira de calxotes	3.800 kcal/kg	Sementes de girassol (9,5% água)	4.300 kcal/kg
Casca de café	3.800 kcal/kg	Madeira muito seca	4.800 kcal/kg	Serragem de pinho (40% água)	2.000 kcal/kg
Casca de cajú	4.700 kcal/kg	Madeira pinho (seca ao ar)	3.500 kcal/kg	Serragem seca (20% água)	3.500 kcal/kg
Casca de côco	4.000 kcal/kg	Madeira verde	2.500 kcal/kg	Serragem + Cepilho (seco)	4.600 kcal/kg
Casca de eucalipto	3.750 kcal/kg	Óleo combustível 1A	9.750 kcal/kg	Sisal (11% água)	3.400 kcal/kg
Casca de tanino úmido (68% água)	800 kcal/kg	Óleo combustível 1B	9.940 kcal/kg	Sobra de serralta (pinho)	4.160 kcal/kg
Casca de soja	3.300 kcal/kg	Óleo combustível 2A	9.550 kcal/kg	Tecido nailon	7.300 kcal/kg
Cavaco (eucalipto)	4.300 kcal/kg	Óleo combustível 2B	9.920 kcal/kg	Trapos de pano	4.200 kcal/kg
Cavacos de pinho	2.500 kcal/kg	Óleo combustível 3A	9.500 kcal/kg	Turfa (seca ao ar) (25 à 6% água)	3000 - 5000 kcal/kg
Coque de gás	5.400 kcal/kg	Óleo combustível 3B	9.870 kcal/kg		

Fonte: Alfa Laval Aalborg, 2010

REFERÊNCIA

ALBARRACIN, ASTRID LORENA TORRES. **Biogás Oriundo de Resíduos com Vetor Energético no Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em:

http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/320768/1/Albarracin_AstridLorenaTorres_M.pdf. Acesso em: 24 abr. 2019.

ALFA LAVAL AALBORG. **PODER CALORÍFICO INFERIOR**. PETRÓPOLIS - RJ, 13 maio 2010. Disponível em: **PODER CALORÍFICO INFERIOR**. PETRÓPOLIS - RJ, 12 maio 2010. Disponível em: <http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/poder-calorifico-inf.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2019. Acesso em: 15 jun. 2019.

ALVES, Moisés. Estudo de sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, com utilização do bagaço e palha da cana. 2011. 114 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266914>>. Acesso em: 14 junho. 2019.

ANEEL-BIG- (**Agência Nacional de Energia Elétrica - Banco de Informações de Geração**) disponível em <www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em 15 ago.2018.

ANEEL E OMM. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL**. BRASÍLIA: [s. n.], 2008. ATLAS. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2019.

ARAÚJO, J. L. Cálculo, Tecnologias e Modelagem Matemática: as discussões dos alunos. (Tese de Doutorado em Educação Matemática) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002. <www.directindustry.com/pt/prod/sundy-science-and-technology/product-122551_1800068.html>. Acesso em: 20 nov. 2018.

BIBLIOTECA DO EXÉRCITO. A energia elétrica no Brasil: da primeira lâmpada à Eletrobrás. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 1977, 244p.

BLUME, Juliana. **Primeira unidade de queima de lixo para energia será construída em 2017 em SP** . 2017. Disponível em:

<<https://hypescience.com/primeira-unidade-de-queima-de-lixo-para-energia-sera-construida-em-2017-em-sp/>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J., MIERZWA, J., BARROS, M., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N. & Eiger, S. Introdução à engenharia ambiental. 2. ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2005.

BRISTOTI, Anildo e Silva, Jairo L. dos S., 1993. “Diagnóstico da utilização e da oferta da biomassa vegetal no Rio Grande do Sul”, Núcleo de energia, PROMEC, UFRGS, Porto alegre.

CALORÍMETRO totalmente automático / isoperibólico / de carvão / por combustão. Brasil, 14 maio 2012. Disponível em: <http://www.directindustry.com/pt/prod/hunan-sundy-science-and-technology-co-ltd/product-122551-1800068.html>. Acesso em: 14 nov. 2018.

EPE — **Empresa de Pesquisa Energética**, Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030, Geração Termelétrica – Carvão Mineral. Brasília, 2007.

EPSTEIN, P., Buonocore, J., Eckerle, K., Hendryx, M., Stout, B., Heinberg, R., Clapp, R., May, B., Reinhart, N., Ahern, M., Doshi, S. & Glustrom, L. Full cost accounting for the life cycle of coal. **Annals of the New York Academy of Sciences**, 1219, p. 73–98, 2011.

GIL, E. F., Segunda lei da termodinâmica: algumas relações com o cotidiano, Cadernos PDE, Versão Online ISBN 978-85-8015-053-7, O Professor PDE e os Desafios da Escola Pública Paranaense, Paraná, Brasil, 2010.

GONÇALVES, Fabiana Santos. Água: moderadora de temperatura. **Termodinâmica**, [S. l.], 23 mar. 2006. Disponível em: <https://www.infoescola.com/termodinamica/agua-moderadora-de-temperatura/>. Acesso em: 5 jun. 2019.

FELTRE, Ricardo, 1928- . **Química** / Ricardo Feltre. — 6. ed. — São Paulo; Moderna, 2004.

FRANK, J.; WITTCHOW, E. **Why will benson boilers replace drum boilers in coal – fired powerplant world wide**. Power-Gen, Asia, 1997.

IEA - International Energy Agency. Disponível em <www.iea.org>. Acesso em: 15 out. 2018.

JUNIOR, Valter Barbosa de Oliveira, 1978-O48m Modelagem de central termelétrica a vapor para simulação dinâmica / Valter Barbosa de Oliveira Junior. – 2009.175 f.: il.

JUNIOR, Joab Silas da Silva. Calor Específico. **Termologia**, [S. l.], 02 mar. 2019. Disponível em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/calor-especifico.htm/>. Acesso em: 5 jun. 2019.

LUDWIG, Rafael; ARÚJO, Adamo de Souza; PUTTI, Fernando Ferrari. USINA TERMELETRICA A PARTIR DA CASCA DE ARROZ. *In*: VIII FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 2012, São Paulo. **Trabalho Acadêmico / Artigo Completo** [...]. São Paulo: ANAP, 2012. Disponível em: http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/331. Acesso em: 24 abr. 2019.

MENDES, Pedro Henrique coelho. Usinas termoelétricas. **A energia da combustão**, Santos - SP, 3 jun. 2015. Disponível em: <https://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/usinas-termoeletricas-energia-combustao.html>. Acesso em: 10 jul. 2019.

MICHELINI, A., JAPPUR, R., SELIG, P. & LERÍPIO, A. Uma proposta de incorporação de indicadores de ecoeficiência ao setor termelétrico brasileiro a carvão mineral. **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Florianópolis, Brasil, 2004.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - (MME). Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016. **Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016**, [S. l.], p. 1, 13 mar. 2017. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/biomassa-e-a-segunda-maior-fonte-de-energia-em-2016. Acesso em: 13 jun. 2019.

MORAN, M. J. e Shapiro, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NR 13 – CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO (Última atualização: Portaria MTb n.º 1.082, de 18 de dezembro de 2018; DOU 20/12/18). Acesso em: 13 jun. 2019

NOGUEIRA, L. A. H.; CARVALHO, F. N. T.; ROSA, F. Cogeração e Geração Distribuída. *In*: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, v. 2, 2004. Cap. 13, p. 1296

OLIVEIRA, A. F. STELLA. Avaliação energética da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes indústrias sucroenergéticas. 2014. 80 f. Dissertação de Mestrado Profissional em Produção – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

RANGEL, RENATO N. - Prática de físico-química. 3º edição revista e ampliada 2006, 336p.

ROCHA, Quéssia de Noronha. **GESTÃO DE ENERGIA DE RESÍDUOS DE BIOMASSA: OTIMIZAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS UNIDADES INDUSTRIAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado e Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica, BRASÍLIA, 2011.

Disponível em:

http://bdm.unb.br/bitstream/10483/3427/1/2011_QuessiadeNoronhaRocha.pdf.

Acesso em: 3 jan. 2019.

SAAD, Marcelo Brant Wurthmann. Avaliação técnica e econômica preliminar da produção de etanol via hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar. / Marcelo Brant Wurthmann Saad; orientador Adilson Roberto Gonçalves. – Lorena: 2010. 138 pág..

SANTOS, Fernando Alves dos. Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: usina de açúcar, etanol e bioeletricidade / F.A. dos Santos. - ed. rev. - São Paulo, 2012. 115 p.

SILVA E COLOMBO. Combustíveis alternativos para termelétricas no Brasil: comparativo quanto à emissão de gases de efeito estufa e geração de energia elétrica. (ENGEMA) Encontro internacional sobre Gestão Empresarial e Meio ambiente. Dezembro de 2016.

SILVA, JOSÉ LÁZARO PINHEIRO DA. **APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – O CASO DA EMPRESA B. K. ENERGIA ITACOATIARA LTDA NO ESTADO DO AMAZONAS**. 2011. Dissertação (Especialista em Gestão da Indústria Madeireira e Moveleira) - Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná., CURITIBA, 2011. Disponível em:

<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/32733/JOSE%20LAZARO%20PINHEIRO%20DA%20SILVA.pdf;jsessionid=99462704F73129FDFBAFB19C56AEF3B3?sequence=1>. Acesso em: 24 abr. 2019.

SILVA, Marcelo Bacci da; MORAES, Anderson dos Santos. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO BAGAÇO DE CANA EM DIFERENTES NÍVEIS DE UMIDADE E GRAUS DE COMPACTAÇÃO. *In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - A INTEGRAÇÃO DE CADEIAS PRODUTIVAS COM A ABORDAGEM DA MANUFATURA SUSTENTÁVEL.*, 2008, Rio de Janeiro.

Avaliação Energética [...]. Rio de Janeiro: Enegep 2008, 2008. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-07avaliacao-energetica-do-bagaco-de-cana-em-diferentes-niveis-de-umidade-e-graus-de-compactacao.pdf>. Acesso em: 23 maio 2019.

STUCHI, GABRIEL AUGUSTO DOMINGOS; LANGHI, MAURICIO TACONELLI E. VICTOR AUGUSTO BERTOLLO. **GERAÇÃO TERMELÉTRICA: PRINCIPAIS COMPONENTES E TIPOS DE CENTRAIS TERMELÉTRICAS**. 2015. 147 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/index.php?option=com_jumi&fileid=11&Itemid=172&id=37A7E00509F3>. Acesso em: 21 jan. 2019.

TEIXEIRA, F. N.; COBAS, V. R. M. Motores de Combustão Interna (MCI) Alternativos. *In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação.* Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, 2004. Cap. 7, p. 1296.

TOLMASQUIM, MAURICIO TIOMNO. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord). – EPE: Rio de Janeiro, 2016, 417p.

ÇENGEL, YUNUS A. Termodinâmica [recurso eletrônico] / Yunus A. Çengel, Michael A. Boles; tradução: Paulo Maurício Costa Gomes; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. – 7. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2013.