

ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA – FACEG
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE BARBOSA RODRIGUES

**MELHORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA TERMOELÉTRICA
COM A IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO TURBOGERADOR.**

GOIANÉSIA

2021

HENRIQUE BARBOSA RODRIGUES

**MELHORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA TERMOELÉTRICA
COM A IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO TURBOGERADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

GOIANÉSIA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

R696

Rodrigues, Henrique Barbosa.

Melhoramento Da Eficiência Energética De Uma Termoelétrica Com A Implementação De Um Novo Turbogenerador / Henrique Barbosa Rodrigues – Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2021 – Faceg, 2021.

61 p.; il. p&b.

Orientador: Prof. Me. Rogério Rodrigues dos Santos.

Monografia de Graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2021.

1. Eficiência Energética. 2. Turbinas à vapor. 3. Sustentabilidade. 4. Engenharia Mecânica

I. Rodrigues, Henrique Barbosa II. Melhoramento Da Eficiência Energética De Uma Termoelétrica Com A Implementação De Um Novo Turbogenerador

CDU 621

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Rodrigues, H.B. **Melhoramento Da Eficiência Energética De Uma Termoelétrica Com A Implementação De Um Novo Turbogenerador.** Trabalho de conclusão Curso (Graduação em Engenharia mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia-GO, 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME: HENRIQUE BARBOSA RODRIGUES

GRAU: BACHAREL

ANO: 2021

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação, única e exclusivamente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.



Nome: Henrique Barbosa Rodrigues

CPF: 067.062.201-08

Endereço: Rua Maria Silva, 34, Santa Luzia - Goianésia, Goiás

E-mail: henriquebrodrigues_@outlook.com

HENRIQUE BARBOSA RODRIGUES

**MELHORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA TERMOELÉTRICA
COM A IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO TURBOGERADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Goianésia, _____ de _____ de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Rogério Rodrigues dos Santos - Orientador
Faculdade Evangélica de Goianésia

Prof. Dr. Thiago Ferreira da Cunha - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

Prof. Me. Ariane Martins Caponi Lima - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

“Deus não nos fez perfeitos e não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu forças quando todas as minhas tinham-se acabado, e, foi minha fortaleza, quando pensava que não tinha mais soluções para os problemas enfrentados, tanto em âmbito acadêmico quanto fora dele, durante toda a minha existência.

Agradeço aos meus pais, Rubens e Leide, por serem a base e inspiração para seguir em frente, nunca desistir, mesmo que surgisse algum empecilho ao longo de toda a minha caminhada. Desde a escola até a faculdade, e creio que por toda a vida, vocês dedicaram seus esforços a mim e meu irmão, para que alcancemos tudo que não puderam, em razão das tantas dificuldades enfrentadas ao longo do tempo.

Ao meu irmão Mateus, que esteve junto a mim em grande parte dessa minha jornada acadêmica. À minha querida avó Elvira, pelos seus ensinamentos e simplicidade, que jamais deixaram que me esqueça das minhas origens. Aos avós Helena, Sebastião e Francisco, que, com certeza, estão alegres no céu.

Agradeço à minha família, minha tia Sunely, Ana Cleude, Maria Helena e a minha madrinha Kassiany, que sempre me ajudaram ao longo da minha vida até a graduação, não medindo esforços para que eu conseguisse me tornar uma pessoa melhor, por meio da minha educação. E também aos demais familiares, alguns membros de forma direta, e outros indiretamente, influenciaram meu desenvolver nesse ciclo.

Aos meus amigos, que compartilharam vários momentos dessa etapa comigo, José Levi, Gustavo, Ana Clara, Ana Caroline, Higor, Leonardo e Neliana. E, aos demais amigos que, apesar do pouco tempo que puderam fazer parte disso comigo, entenderam minha ausência em vários momentos.

Ao meu professor orientador, Rogério Rodrigues, por ter aceitado o convite e por ter compartilhado seus conhecimentos, fomentando, diretamente, o melhor desenvolvimento da pesquisa. Aos demais docentes que participaram do meu ciclo acadêmico e que puderem contribuir para a minha graduação em engenharia mecânica.

Ao meu ex-supervisor e amigo, Alan, que ajudou abrir minha mente como profissional, e, sempre acreditou no meu potencial. A todas as pessoas que contribuíram para este trabalho, inclusive os profissionais da época do meu estágio em engenharia, na usina termoelétrica, onde pude começar a minha vida profissional, tendo sido a base deste estudo de caso.

RESUMO

O presente trabalho trata-se da verificação do melhoramento da eficiência energética de uma usina termoelétrica, localizada no Município de Goianésia, no Estado de Goiás, que utiliza o bagaço e a palha da cana de açúcar, como fonte de energia para a implementação de um novo turbogerador. O objetivo geral do estudo se baseou na análise energética de uma usina termoelétrica no interior de Goiás, a fim de obter informações de eficiência das turbinas à vapor, valores de vapor admitido, como também os valores de produção de energia elétrica gerada nos últimos anos, a fim de verificar se a instalação da turbina de extração-condensação melhorou a eficiência energética na planta. No que tange à metodologia, trata-se de uma pesquisa exploratória, com foco quantitativo, por meio de um estudo de caso. A partir dos estudos termodinâmicos realizados, foi possível constatar que houve ~~melhora~~ melhoria da eficiência energética, com a implantação de uma nova turbina na termoelétrica. Contudo, é possível ampliar ainda mais sua eficiência, na medida em que as três turbinas existentes não podem funcionar simultaneamente.

Palavras-chaves: Eficiência Energética. Turbinas a Vapor. Sustentabilidade. Engenharia Mecânica.

ABSTRACT

This research deals with the verification of the improvement of the energy efficiency of a thermoelectric power plant, located in the municipality of Goianésia, in the state of Goiás, which uses bagasse and sugarcane straw, as a source of energy for the implementation of a new turbogenerator. The general objective of the study was to carry out energy analysis of a thermoelectric power plant in the interior of Goiás, in order to obtain information on the efficiency of steam turbines, values of permitted vapour, as well as the production values of electricity generated in recent years, in order to verify whether the installation of the extraction-condensation turbine has improved the energy efficiency in the plant. Regarding the methodology, it is exploratory research, with a quantitative focus, through a case study. From the thermodynamic studies carried out, it was possible to observe that there was an improvement of the energy efficiency, with the implantation of a new turbine, in the thermoelectric. However, it is possible to further increase their efficiency, as the three existing turbines cannot operate simultaneously.

Key words: Energy Efficiency. Steam Turbine. Sustainability. Mechanical Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Potencial de exportação de eletricidade gerada por bagaço-de-cana.....	10
Figura 2- Processos envolvidos na produção da energia elétrica proveniente do bagaço-de cana	11
Figura 3 - Componentes de uma instalação de potência a vapor (ciclo Rankine).....	16
Figura 4 - Turbina a vapor de condensação	21
Figura 5 - Turbina a vapor de contrapressão	23
Figura 6 - Layout Simplificado do Processo de Cogeração de Energia na Planta Termoelétrica	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poder calorífico superior (kJ kg ⁻¹) de diferentes resíduos agroindustriais	12
Tabela 2 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 1	27
Tabela 3 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 2	27
Tabela 4 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 3	27
Tabela 5 - Dado de projeto do Turbogenerador 1	28
Tabela 6 - Dado de projeto do Turbogenerador 2	28
Tabela 7 - Dado de projeto do Turbogenerador 3	29
Tabela 8 - Valores diários e média da eficiência das turbinas.....	30
Tabela 9 - Médias das combinações de eficiências dos turbogeradores.....	31
Tabela 10 - Razão de dados anuais de produção de vapor e geração de energia elétrica por turbina.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
CONFEA	Conselho Federal de Engenharia e Agronomia
ENEL	Ente Nazionale per l'Energia Elettrica
GW	Gigawatt
Nm ³	Normal metro cúbico
b.u	Umidade em base úmida
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
Q	Calor
W	Trabalho
J	Joule
η	Rendimento
S	Entropia
H	Entalpia
t	Tonelada
TG1	Turbogerador 1 ou Turbina 1
TG2	Turbogerador 2 ou Turbina 2
TG3	Turbogerador 3 ou Turbina 3
TG's	Turbogeradores ou Turbinas
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificativa	3
1.4 Questão Problema ou Problema de Pesquisa	4
2 REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 A Engenharia Mecânica e o desenvolvimento sustentável	5
<i>2.1.1 Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável</i>	6
<i>2.1.2 Engenharia Mecânica e Desenvolvimento Sustentável à luz do Código de Ética do CONFEA</i>	8
2.2 A Energia Proveniente do Bagaço-de-Cana	9
2.3 Conceitos Termodinâmicos	13
2.4 Turbinas à Vapor	20
3 METODOLOGIA	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Obtenção de dados	26
4.2 Cálculos	29
5 CONCLUSÃO	35
ANEXOS	43

1 INTRODUÇÃO

A diversidade biológica e o equilíbrio ecológico sofrem graves ameaças que são ampliadas pelas demandas da população crescente, bem como as demais circunstâncias que envolvem o desenvolvimento tecnológico. Com efeito, as sociedades contemporâneas, especialmente marcadas pelo consumo desenfreado, já vivenciam sérios impactos ambientais devido ao uso dos recursos naturais de forma imprudente e exacerbada. Diante disso, as áreas da engenharia, incluindo a engenharia mecânica, devem se atentar para o contexto socioambiental em prol do desenvolvimento sustentável (SIQUEIRA et al, 2016).

Por certo, a busca por aumento da produção e diminuição do consumo de recursos naturais utilizados, sob a égide da ideia de sustentabilidade, é um grande desafio enfrentado pelas empresas. Não obstante, objeto de preocupação atual se refere à energia, inclusive considerando a dependência da exploração de petróleo e combustíveis fósseis, bem como a escassez hídrica que coloca em risco a produção e manutenção de energia hidrelétrica (RIBEIRO, 2018). Diante desse cenário, as empresas precisam buscar meios alternativos de energia, ponderando aspectos como diminuição de custos, responsabilidade ambiental, agregação de valores, entre outros.

No caso de sites de usinas termoelétricas, estas buscam maneiras de melhorar seus processos, visando a obtenção de melhores resultados com a redução dos custos. Além disso, transformar o bagaço-de-cana como uma alternativa de energia renovável é uma realidade no País, já que, segundo a ANEEL-AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2008), o Brasil se destaca como o segundo maior produtor de etanol que, obtido a partir da cana-de-açúcar, gera o bagaço-de-cana como resíduo. Assim, a utilização desse recurso para a geração de energia apresenta potencial energético similar e custos menores, corroborando com a noção de sustentabilidade.

Um dos grandes objetivos do site escolhido como objeto de estudo desta pesquisa é que o mesmo buscou aumentar a geração de energia elétrica, para exportação para a subestação da distribuidora local, no caso, a ENEL, Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, uma empresa italiana multinacional com atuação no Estado de Goiás, a por meio da instalação de um novo turbogerador, no ano de 2018, onde já existiam outros dois turbogeradores. Logo, é essencial o desenvolvimento de cálculos termodinâmicos para comprovação do ganho esperado a partir da instalação de um novo turbogerador.

Esta empresa multinacional possuía os antigos dois turbogeradores de contrapressão e condensação, respectivamente instalados na central de geração de energia, herdadas desde a parceria firmada com uma usina de açúcar e álcool, a qual detém, ainda, uma porcentagem do negócio. Com a visão e o *know-how* para exportação de energia, a nova instalação eleva a capacidade da termoelétrica, e, conseqüentemente, aumenta a confiabilidade do site devido a disposição de mais um ativo. A produção se faz através do subproduto fornecido pela empresa parceira de açúcar e álcool que é o bagaço-de-cana e a palha, que é resultado do processo de moagem e da retirada da cana das lavouras, que, até então, era uma fonte de energia descartada.

Hoje em dia, vem aumentando cada vez mais a utilização do bagaço-de-cana como fonte de energia alternativa, que, nesse caso, possui um sistema básico de queima dessa matéria-prima em caldeira de alta pressão, de 65 kgf/cm² a 490°C, liberando alta quantidade de calor, o qual conta com o auxílio de água pré-aquecida e desaerada, gerando vapor vivo ou vapor superaquecido. Este é, então, direcionado para as turbinas, na central termoelétrica, onde a energia térmica do vapor é convertida em energia mecânica e, posteriormente, em energia cinética, quando se desloca ao longo da turbina. A energia cinética se converte em trabalho mecânico. A energia mecânica rotacional promovida pela turbina conecta-se ao gerador elétrico através de um eixo, que por sua vez transforma a rotação em energia elétrica. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2015).

Com a instalação do terceiro turbogerador, o projeto teve que ser alterado. Também houve limitações no sistema de resfriamento de vapor das três turbinas, que não funcionam simultaneamente. Com a implantação de um novo equipamento, acredita-se que houve melhoria na capacidade de geração de energia ao longo dos períodos da safra da usina termoelétrica, em relação a períodos passados de disponibilidades das outras turbinas. Desse modo, é de suma importância que a verificação de desempenho com a instalação da terceira turbina, a fim de constatar se realmente houve melhora na eficiência energética da planta.

1.1 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é realizar análise energética de uma usina termoelétrica no interior de Goiás, a fim de obter informações de eficiência das turbinas à vapor, valores de vapor admitido como também os valores de produção de energia elétrica gerada nos últimos anos, a fim de verificar se a instalação da turbina de extração-condensação melhorou a eficiência energética na planta.

1.2 Objetivos específicos

- Apresentar a responsabilidade do engenheiro mecânico no desenvolvimento sustentável de processos industriais;
- Expor as etapas de transformação de energia da matéria-prima do bagaço de cana-de-açúcar até a geração de energia elétrica;
- Apresentar conceitos termodinâmicos como auxílio teórico para desenvolvimento de resultados;
- Exibir conceitos de eficiência energética;
- Mostrar as definições e funcionamentos de turbinas à vapor;
- Realizar a análise energética com a implantação da 3ª turbina.

1.3 Justificativa

A utilização consciente dos recursos naturais é um assunto de suma importância na sociedade mundial, já que garantem o desenvolvimento humano e econômico das nações, como em alimentos, roupas, construções, materiais eletrônicos e a energia. Dessa forma, tal questão é essencial para a existência da vida no planeta. Entretanto, esses recursos não são distribuídos de forma igualitária no mundo e isso faz com que alguns materiais apresentem um maior valor em decorrência da sua alta procura e pouca disponibilidade, provocando conflitos entre países para conseguir ser o detentor do produto (BEATO, 2018).

Cumprе salientar que os recursos naturais são divididos em dois tipos: os renováveis e os não renováveis. Os recursos naturais não renováveis são aqueles que não se regeneram na natureza, ou, aqueles que possuem processos de regeneração lentos, o que acarreta o esgotamento se utilizado de forma irracional. Não obstante, geralmente a utilização desse tipo de recursos naturais resulta em impactos ambientais que se revelam nas mais variadas formas de poluição, afetando o equilíbrio ecológico, a diminuição da biodiversidade, e assim, alterando a qualidade de vida das pessoas. Já os recursos naturais renováveis são aqueles que existem em abundância, e que podem se regenerar em curto espaço de tempo. Entretanto, na maioria das vezes, a indiscriminada utilização desses recursos gera impactos na sua manutenção no meio ambiente, podendo provocar maior demora da sua reposição e, com isso, a necessidade de

estabelecer estratégias na utilização de menor quantidade de recursos naturais renováveis, bem como produzir mais.

Nesse contexto, a ideia de eficiência energética significa gerar a mesma quantidade de energia com menos recursos naturais ou obter o mesmo serviço, realizar trabalho, com menos energia, como esclarece o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética. Logo, esse tema é de suma importância para as empresas do ramo de geração de energia, e, para os profissionais envolvidos, como os engenheiros mecânicos, tendo em mente que produzir mais energia, com utilização de matéria-prima que antes descartada, reflete maior ganho econômico. Por outro lado, o consumidor final também pode alcançar menor gasto na sua conta de energia. Assim, se faz a justificativa do estudo de análise da eficiência energética com um novo equipamento da usina termoeletrica escolhida, pois, além de afetar positivamente a empresa de geração de energia, afeta indiretamente a sociedade consumidora de energia elétrica por ela produzida.

Com efeito, o envolvimento dos estudantes de Engenharia Mecânica nesse tema é de extrema importância, já que esses futuros profissionais atuarão na área industrial onde há a necessidade de reduzir os impactos ambientais, proporcionando qualidade entre a relação social e os recursos naturais (BAZZO, 1998; BACCI, SILVA, SORRENTINO, 2015; ARAUJO et al 2014 apud. (DOS SANTOS, SIQUEIRA, *et al.*, 2019)). O Engenheiro tem a função, como será demonstrado, de desenvolver estratégias de melhor aproveitamento dos recursos naturais, a fim de possibilitar a identificação e solução de problemas, promovendo o desenvolvimento na sociedade considerando os aspectos econômicos, sociais, políticos, culturais e ambientais.

1.4 Questão Problema ou Problema de Pesquisa

A presente pesquisa tem como abordagem a geração de energia renovável, a partir de matéria orgânica até então descartável, no caso em questão, o bagaço-de-cana e a palha, corroborando com a noção de sustentabilidade. Além disso, o estudo tem como objeto a eficiência energética de termoeletrica localizada no interior do estado de Goiás, tendo a mesmo passado de duas para três turbinas, sendo que todas não funcionam simultaneamente.

Nesse contexto, tem-se que a Engenharia Mecânica possui prerrogativas como a identificação de perda nos processos, a viabilidade técnica e econômica, entre outras, que venham a proporcionar o aumento da eficiência da planta, ou seja, com melhor aproveitamento

dos recursos naturais, menor impacto ambiental e, também, menores custos operacionais (MACIEL, 2004).

Com isso exposto, a questão problema da pesquisa é:

A partir de estudos termodinâmicos, é possível afirmar que houve melhoria da eficiência energética, com a implantação de uma nova turbina na termoelétrica localizada no interior do Estado de Goiás em análise?

Martins (2018), com a realização de sua pesquisa, informa que existem fatores que podem levar à perda de eficiência das máquinas. Conforme a mesma autora, as condições do projeto influenciam diretamente na perda ou ganho de rendimento, incluindo a possibilidade de melhor aproveitamento de todos os recursos disponíveis à usina termoelétrica, bem como também influenciam condições de extração e condensação. Logo, como hipótese ao problema proposto, espera-se que a termoelétrica, objeto de análise deste estudo, mesmo com a instalação da nova turbina, não tenha alcançado melhoria na eficiência energética, considerando que as três turbinas não funcionam simultaneamente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A energia elétrica é extremamente importante para a sociedade atual. Por outro lado, o mundo vivencia uma nova crise energética, na qual a ideia de aproveitamento de insumos renováveis, como os resíduos descartáveis do bagaço da cana-de-açúcar e suas palhas, se destaca, especialmente por conter aspectos que impactam de forma positiva o meio ambiente e a manutenção de seu equilíbrio, gerando benefícios econômicos, sociais e tecnológicos, bem como assegura acessibilidade à energia elétrica pelos usuários (CHATOSKI, et al., 2020).

A partir disso, é certo que as atividades econômicas relacionadas devem estar voltadas para a consecução do desenvolvimento sustentável, o que inclui, invariavelmente, a Engenharia Mecânica, como será demonstrado a seguir.

2.1 A Engenharia Mecânica e o desenvolvimento sustentável

Para que se compreenda a relação entre a Engenharia Mecânica e o desenvolvimento sustentável, é preciso, de início, esclarecer a noção do que é o desenvolvimento sustentável. Assim, este ponto do presente estudo tem por premissa esclarecer sobre sustentabilidade e

desenvolvimento sustentável para, posteriormente, inserir o tema na área da Engenharia Mecânica propriamente, incluindo questões relacionadas ao Código de Ética que norteia os respectivos profissionais.

2.1.1 Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável

O termo ‘ambiente’ deriva do latim *ambiens*, que possui o significado substantivo de lugar, espaço, e, significado adjetivo como envolvente. Com esse entendimento, meio ambiente deve ser considerado como a interação de elementos naturais, artificiais e culturais, de modo a propiciar ao ser humano a sadia qualidade de vida (CARVALHO, 2013). Logo, pode-se afirmar que o ser humano integra o meio em que vive, cabendo a ele usufruir e também corroborar pela qualidade de vida das demais pessoas, e, do equilíbrio ambiental.

Seguindo essa perspectiva, o meio ambiente se relaciona, na ordem jurídica brasileira, com os ideais de fraternidade e solidariedade entre os povos, sendo considerado imprescindível para a materialização da dignidade da pessoa humana, e até para a manutenção da vida. Ademais, o atual Direito Brasileiro determina o meio ambiente, com fulcro na sadia qualidade de vida, como um direito fundamental de todos, previsto na Constituição da República Federativa do Brasil, de 1988 (AGRA, 2018). Assim, a Constituição brasileira reconhece a importância do equilíbrio ambiental e a necessidade de conservação de recursos, e também sadia qualidade de vida, não apenas para as atuais gerações, mas também às futuras (QUONIAN, et al. 2020).

Isso demonstra que o Estado brasileiro reconhece, em sua principal norma, que o meio ambiente sadio à qualidade de vida é verdadeira prerrogativa, de modo a alcançar todos os aspectos da vida em sociedade. Como exemplo dessa afirmação, tem-se que o Artigo 170, em seu inciso VI, da Constituição brasileira, que dispõe sobre a Ordem Econômica nacional, determina, dentre seus princípios, a defesa do meio ambiente, exigindo, inclusive tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação (BRASIL, 2021, online).

Sobre o referido dispositivo constitucional, a defesa do meio ambiente assume papel de princípio da ordem econômica nacional, tendo em consideração o aumento dos índices de poluição e os impactos ambientais irreversíveis, gerados pelas atividades econômicas. A questão é tão séria que, de acordo com dados da Organização Mundial da Saúde, até 23% das

mortes que ocorrem pelo mundo todo estão relacionadas com fatores ambientais diretos, ou seja, anualmente, quase sete milhões de pessoas morrem por causa de algum tipo de poluição ou impacto ambiental (MIRANDA, 2021). Partindo dessa compreensão, tem-se que o desenvolvimento econômico deve ser realizado com respeito ao meio ambiente e seu equilíbrio, buscando constantemente a melhoria dos processos com o menor impacto ambiental possível (AGRA, 2018).

Em outras palavras, é lícito afirmar que o princípio da ordem econômica da defesa do meio ambiente representa o entendimento constitucional que se consubstancia na necessidade de harmonização entre as atividades econômicas e preservação ambiental. Ou seja, há a clara intenção do constituinte em buscar o constante equilíbrio entre crescimento econômico e preservação ambiental, evidenciando as noções de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável (GARCIA, 2016).

A ideia de sustentabilidade, desde o Relatório de Brundtland, de 1987, é definida como “O desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir as próprias necessidades”. Tal conceito, portanto, é constituído por três dimensões, sendo elas a ambiental, a social e a econômica. Além disso, de extrema relevância, no âmbito da definição em exame, é a perspectiva de que as gerações futuras deverão poder usufruir dos recursos naturais da mesma forma que as gerações atuais, de maneira a forçar todos a atuarem em prol do equilíbrio ambiental necessário à sadia qualidade de vida (THORSTENSEN; MOTA, 2020).

A sustentabilidade, portanto, representa a reintegração do homem com o meio ambiente, de modo a chamá-lo a atuar de maneira racional e responsável, ambientalmente, em todos os aspectos da vida. Por conseguinte, o desenvolvimento sustentável exige que as atividades econômicas sejam limitadas e condicionadas ao impacto ambiental gerado, inclusive sob o manto constitucional brasileiro (ARAUJO, 2021).

Sendo assim, o próximo objeto de estudo da pesquisa se volta para a análise da relação das atividades da Engenharia Mecânica com o Desenvolvimento Sustentável, especialmente à luz do Código de Ética a que são submetidos esses profissionais.

2.1.2 Engenharia Mecânica e Desenvolvimento Sustentável à luz do Código de Ética do CONFEA

Antes de adentrar especificamente no Código de Ética que norteia a Engenharia Mecânica, avulta-se apontar que a Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966, que regula o exercício das profissões de Engenheiro reconhece, em seu Artigo 1º, que as atividades realizadas por seus destinatários possuem interesse social e humano, na medida em que as mesmas devem buscar o aproveitamento e utilização adequada de recursos naturais. Essa mesma norma também institui o Conselho Federal de Engenharia e Agronomia, (CONFEA), como a instância superior da fiscalização do exercício profissional da engenharia, que dentre suas atribuições está a de elaboração de normas gerais, regimento interno, entre outros (BRASIL, 2021, online).

No exercício de suas atribuições, o Conselho Federal de Engenharia e Agronomia, no ano de 2002, homologou um novo Código de Ética, por meio da Resolução nº 1002/2002, de modo que todos os profissionais relacionados são a ele submetidos, abrangendo os engenheiros mecânicos. De acordo com o Artigo 6º, do referido Código de Ética, o objetivo das profissões, assim como a ação desses profissionais deve ser voltada para o bem-estar e o desenvolvimento do homem, em seu ambiente, incluindo a geração atual e as futuras (CONFEA, 2021, online).

Não obstante, o Artigo 8º, do mesmo documento, determina como um dos princípios éticos da engenharia a intervenção profissional sobre o meio, de modo que suas atividades devem ser exercidas com fundamento nos preceitos do desenvolvimento sustentável, considerando, ainda, a incolumidade das pessoas, de seus bens e de seus valores. Mais adiante, no Artigo 9º, V, quando o Código trata dos deveres dos profissionais sob sua jurisdição, novamente de forma expressa, ele impõe que o exercício das respectivas atividades é vinculado aos preceitos do desenvolvimento sustentável, aos princípios e recomendações de conservação de energia e de minimização dos impactos ambientais, bem como, ter as próprias diretrizes voltadas para a preservação e desenvolvimento ambiental e sociocultural (CONFEA, 2021, online).

Já o Artigo 10, do Código de Ética das Engenharias, entre outros, o qual define as condutas proibidas aos profissionais, também apresenta vedações quanto ao meio. Isso porque, tal norma proíbe o exercício de condutas, pautadas de má-fé, que possam resultar em dano ao ambiente natural, à saúde humana ou ao patrimônio cultural. Por fim, o Artigo 13 estabelece que todo ato cometido por esses profissionais, que sejam atentatórios aos princípios éticos, que

descumpram os deveres a eles imputados, ou, que pratique quaisquer das condutas proibidas, se constitui em infração ética, que deverá ser apurada em processo disciplinar, sob pena de responsabilização (CONFEA, 2021, online).

Por certo, a Engenharia Mecânica, e a realização das respectivas atividades por seus profissionais, é caracterizada pela busca de melhoria de processos. E, nesse escopo, o desenvolvimento sustentável é algo intrínseco das diretrizes que permeiam as atividades do engenheiro mecânico, considerando não apenas o que manda a Constituição e o Código de Ética da Engenharia, mas, sobretudo, em razão da conscientização da urgência de todos em proteger o meio ambiente, seu equilíbrio, e sua essencialidade para a manutenção da vida. e está com a devida qualidade (QUONIAN, et al. 2020).

2.2 A Energia Proveniente do Bagaço-de-Cana

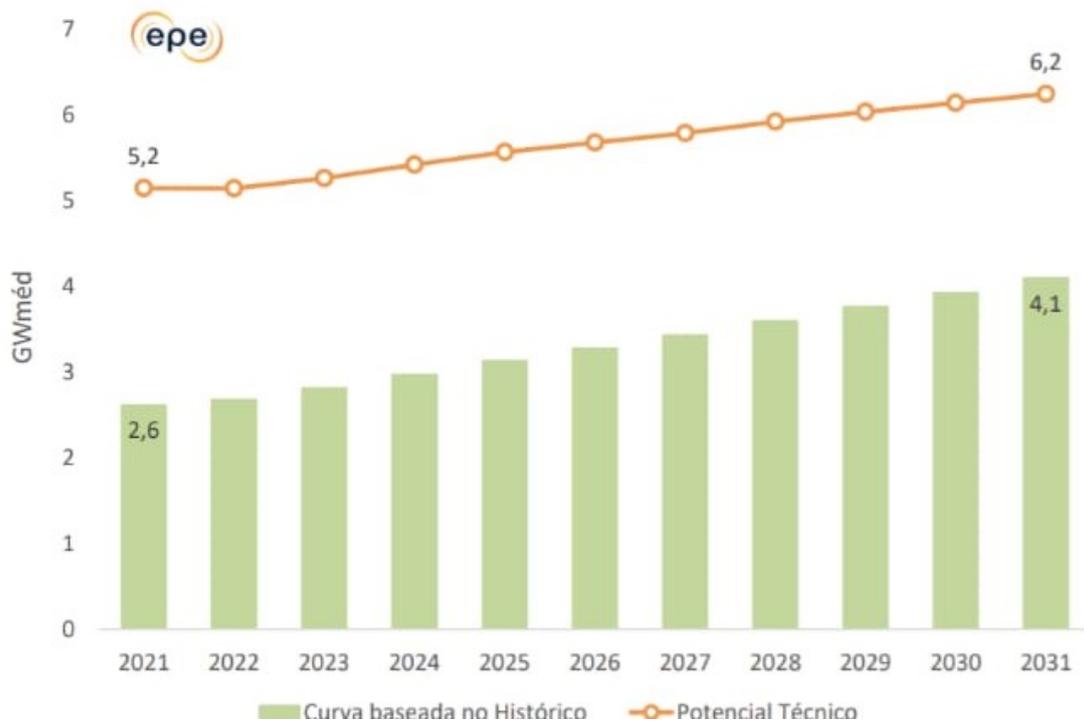
A energia elétrica é algo essencial na sociedade atual, da qual dependem empresas e pessoas físicas para a realização de suas atividades, nos mais diversos setores. Além disso, com a inovação constante de tecnologias, bem como o aumento do consumo, é imprescindível que se disponha um sistema de energia acessível aos usuários, com menor impacto ambiental, e, confiável. Diante disso, o bagaço-de-cana, que até então era um resíduo descartado, passou a ser utilizado como fonte de energia elétrica (CASTRO et al. 2020).

Cumprе esclarecer que a energia oriunda do bagaço-de-cana é considerada energia de biomassa, sendo que biomassa é tida como toda matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal, que tenha potencial para a produção de energia por meio de processos de combustão, estando excluídos os combustíveis de origem fóssil. A grande disponibilidade de recursos que se enquadram nessa categoria aliada à intensificação da industrialização e da urbanização de regiões rurais, tornam a energia de biomassa atrativa economicamente. Ademais, outra vantagem não menos importante se revela no campo ambiental, pois trata-se de aproveitamento de resíduos que seriam descartados, bem como, a geração de energia ocorre com baixo impacto de carbono (SEMITELA, 2018).

Informações do Ministério de Minas e Energia apontam que a capacidade de geração da biomassa, a partir do bagaço-de-cana, alcançou 12,1 GW em agosto de 2021, o que representa aumento superior a 30%, com relação aos últimos cinco anos. Não obstante, o mesmo documento apresenta estimativa, para o ano de 2031, de que o potencial de biogás alcançará 7,1

bilhões de Nm³ (3,8 bilhões de Nm³ de biometano) (BRASIL, 2021, online). Além disso, a utilização do bagaço da cana-de-açúcar como biomassa se destaca por apresentar maior representatividade na matriz energética brasileira nesse setor, de forma que é responsável pelo suprimento de energia térmica mecânica e elétrica em unidades de produção de açúcar e álcool, ou ainda, há produção excedente para a comercialização (TEIXEIRA et al. 2019). Nesse contexto, cumpre apresentar a Figura 1, a qual apresenta a o potencial de exportação de eletricidade gerada por bagaço-de-cana.

Figura 1- Potencial de exportação de eletricidade gerada por bagaço-de-cana



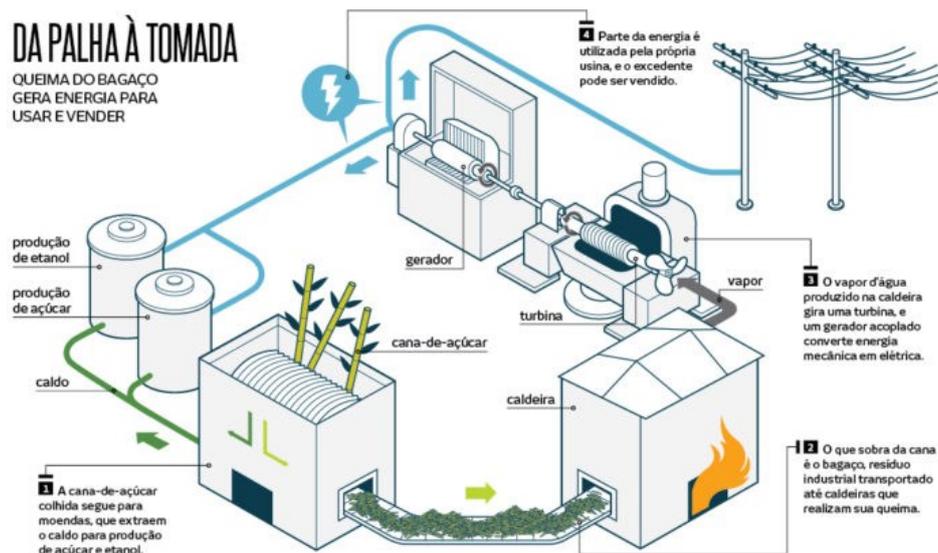
Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia, 2021

Resultante do esmagamento da cana-de-açúcar para produção de etanol e açúcar, o bagaço possui alto teor de fibras, sendo possível utilizá-lo na produção de vapor e energia elétrica (ARAÚJO; RONQUIM FILHO, 2018). Isso se dá por meio da cogeração de energia, que, de acordo com a Resolução Normativa nº 235/2006 da ANEEL, Artigo 3º, I, refere-se ao “processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária” (BRASIL, 2021, online).

Em outras palavras, a cogeração de energia é a produção simultânea de energias mecânica e térmica, que nesse caso, tem como fonte primária de combustível o bagaço-de-cana. Tal processo termoelétrico se dá pela conversão da energia térmica em energia mecânica, que, por seu turno, é convertida em energia elétrica. Para que a energia térmica se transforme em mecânica, é preciso um fluido em processo de expansão, produzindo, então, trabalho em máquinas térmicas, sejam turbinas ou motores. O gerador elétrico, por sua vez, é acoplado ao eixo da turbina ou motor, que, ao realizar o trabalho, aciona mecanicamente o gerador, o que permite a conversão da energia mecânica em elétrica (DOMINGUES, 2020).

Dito isso, a Figura 2 representa os processos envolvidos na produção de energia elétrica gerada por bagaço-de-cana

Figura 2- Processos envolvidos na produção da energia elétrica proveniente do bagaço-de cana



Fonte: EOS Organização e Sistemas Ltda, 2021.

Importante salientar acerca do poder calorífico que envolve o processo em questão. Para tanto, considera-se que poder calorífico é uma característica de um combustível que indica a quantidade de calor a ser liberada durante a combustão completa do mesmo. Esse valor pode ser obtido de forma experimental ou analítica, desde que conhecida a composição elementar da substância/combustível (OLIVEIRA et al, 2016).

Assim, o poder calorífico material pode determinar a energia contida em um resíduo, isto, a quantidade de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa desse corpo (kJ kg⁻¹) (BERTOZZO et al, 2011).

Ocorre que cada resíduo utilizado para produção de vapor e energia possui um poder calorífico, influenciando diretamente no desempenho dos processos envolvidos, como demonstrado na tabela a seguir:

Tabela 1 - Poder calorífico superior (kJ kg⁻¹) de diferentes resíduos agroindustriais

Resíduos	Poder Calorífico Superior (kJ kg ⁻¹)
Casca de eucalipto	15507
Casca de semente de algodão	11723
Bagaço da cana-de-açúcar	17876
Palha de arroz	14654
Casca de café	16466
Casca de coco babaçu	18841
Sabugo de milho	12142

Fonte: Bertozo et al (2011)

Cumprе salientar que o aproveitamento energético de bagaço de cana-de-açúcar é vinculado a fatores que estão relacionados, principalmente, à umidade e ao grau de compactação, que devem ser ponderados, pois os mesmos influenciam diretamente o desempenho do processo. Em geral, 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; MORAIS, 2008).

Não obstante, o poder calorífico se classifica em inferior ou superior, que podem ser matematicamente determinados por meio das seguintes expressões, como apontam Oliveira et al (2016):

$$PCI = PCS - 0,0894 * 2442,3 * H \quad (1)$$

$$PCS = 349,1C + 1178,3H + 100,5S - 103,4O - 15,1N - 21,1W \quad (2)$$

Onde: C, H, S, O, N, A e W são respectivamente as porcentagens mássicas de carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio, cinzas e umidade no combustível.

Tais cálculos são válidos desde que seja ponderada a água formada do hidrogênio, que tenha feito parte da composição do combustível, na fase de vapor. Ressalta-se que o PCS também pode ser alcançado diretamente por equipamento específico (OLIVEIRA et al, 2016).

Desse modo, o PCS trata da energia calorífica que é liberada na queima do combustível, considerando que todo o vapor d'água dos produtos da combustão se condensou. Por outro lado, o PCI não considera a energia dissipada na condensação do vapor d'água. Logo, para a realização dos cálculos, leva-se em conta o poder calorífico inferior, tendo em mente que o poder calorífico dos combustíveis gasosos se revela em energia por unidade de volume, valendo-se das unidades kJ/m^3 e kcal/m^3 (SEMITELA, 2018).

2.3 Conceitos Termodinâmicos

A busca por meios eficientes de produção de energia tem como importante instrumento as noções que se relacionam com a termodinâmica. Com efeito, ter conhecimento sobre as leis que podem maximizar a energia produzida, garantindo sua conservação e conversão, é imprescindível (TAKIYA et al. 2020).

De início, pode-se dizer que a termodinâmica está relacionada com a movimentação de partículas e a conseqüente formação de calor. Assim, o sistema termodinâmico é macroscópico e finito, e, o movimento desordenado das partículas é denominado de movimento térmico. No que se refere à sua finitude, significa dizer que o sistema existe dentro de fronteiras, podendo sofrer influência das forças externas. Tais fronteiras são as paredes do sistema que podem transmitir energia térmica através do calor, que são as paredes diatérmicas, ou, paredes que não permitem essa troca, denominadas de paredes adiabáticas (SILVA, 2021).

Desse modo, corpos com temperaturas diferentes, em um mesmo sistema fechado, irão realizar transferência de energia térmica entre si, do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura, até que se alcance o equilíbrio térmico. A partir disso, existem leis da termodinâmica que se baseiam na possibilidade de transferência de energia térmica entre dois corpos, e/ou, a conversão dessa energia em outra modalidade, por meio do trabalho. A Lei Zero da Termodinâmica não define temperatura, mas sim, ao estabelecer certa propriedade transitiva entre os corpos, ela fornece um meio de medir a temperatura dos corpos observando apenas as propriedades macroscópicas (TAKIYA et al. 2020).

Já a Primeira Lei da Termodinâmica se pauta no princípio da conservação de energia, considerando a aplicação de forças que podem modificar a energia interna de um dado sistema. Logo, a Primeira Lei da Termodinâmica estabelece que a variação da energia interna (ΔU) de um sistema é obtida por meio da diferença de energia térmica adquirida através de calor, usualmente chamada de quantidade de calor Q , e a energia que o próprio sistema converte através de trabalho W (SILVA, 2021).

$$\Delta U = Q + W \quad (3)$$

Onde: ΔU representa variação de energia;
 Q representa a energia térmica adquirida pelo sistema através de calor;
 W representa a energia que o próprio sistema converte através de trabalho.

Nota-se, pela equação (3), que Q e W não são medidas de calor e trabalho, mas sim, as quantidades de energias adquiridas ou perdidas pelo sistema, por meio dos métodos de transferência de energia chamado calor e trabalho, respectivamente. Assim, Q e W possuem unidades de energia, o Joule (J) (SILVA, 2021).

No que tange à Segunda Lei da Termodinâmica trata da transferência da energia térmica, ou seja, a mesma determina que o calor é transferido do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura de forma espontânea. Dessa maneira, o corpo de menor temperatura, que não transfere calor, é aquecido, pela transferência de calor vinda do corpo de maior temperatura, até certo ponto, o que evidencia a importância de se conhecer essa temperatura, e, qual as necessidades mínimas de utilidades de aquecimento e resfriamento do processo. Outro importante aspecto da Segunda Lei da Termodinâmica estabelece que todo processo tem perda, de modo que seu rendimento sempre é inferior a 100% (MELO, 2020).

O enunciado de Kelvin-Planck, que dispõe sobre o rendimento térmico, é expresso pela seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A} \quad (4)$$

Onde: η representa o rendimento
 Q_A representa o calor fornecido por aquecimento
 Q_B representa o calor não transformado em trabalho, perdido ou rejeitado.

Depreende-se dessa expressão que o rendimento de uma máquina termodinâmica deve levar em consideração que nem todo calor chega a ser transformado em trabalho, isto é, há uma

parcela que é perdida, conforme enunciado de Kelvin-Planck. É nesse ponto que se adentra no raciocínio do físico Sadi Carnot, do qual se conclui que há um limite à eficiência da máquina de calor ideal. Carnot, que viveu entre 1796-1832, em meio à Revolução Industrial, a partir da análise das máquinas térmicas concluiu que as mais eficientes permitiam transferência de calor da temperatura mais alta para a temperatura mais baixa, tendo em mente que a transferência de calor é irreversível. Com essa perspectiva, tem-se que a transferência de energia térmica é essencial para o trabalho, e, sem esquecer que nem todo o calor é transformado em trabalho (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2021).

Sendo assim, é possível afirmar que a máquina térmica ideal é a de Carnot, justamente porque está associada ao princípio variacional, bem como por maximizar o ganho, ou o trabalho a ser feito, sem alterar a entropia do universo. Este se entende como um sistema enorme, mas limitado, e isolado, dentro do qual encontramos um sistema menor, onde acontecem os processos reversíveis ou irreversíveis (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2021).

Logo, a máquina de Carnot estabelece um limite de rendimento sem comprometer a reversibilidade do processo e reduzir a energia útil. Dessa forma, a noção que envolve o ciclo de Carnot revela que cada ciclo de trabalho tem um limite máximo (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2021).

Importante salientar que a máquina de Carnot é considerada o único motor térmico reversível capaz de rodar um ciclo com apenas dois acumuladores de calor, sendo cada um deles com uma temperatura fixa. Por conseguinte, a máquina de Carnot, dentre os motores reversíveis, é a que oferece melhor rendimento (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2021).

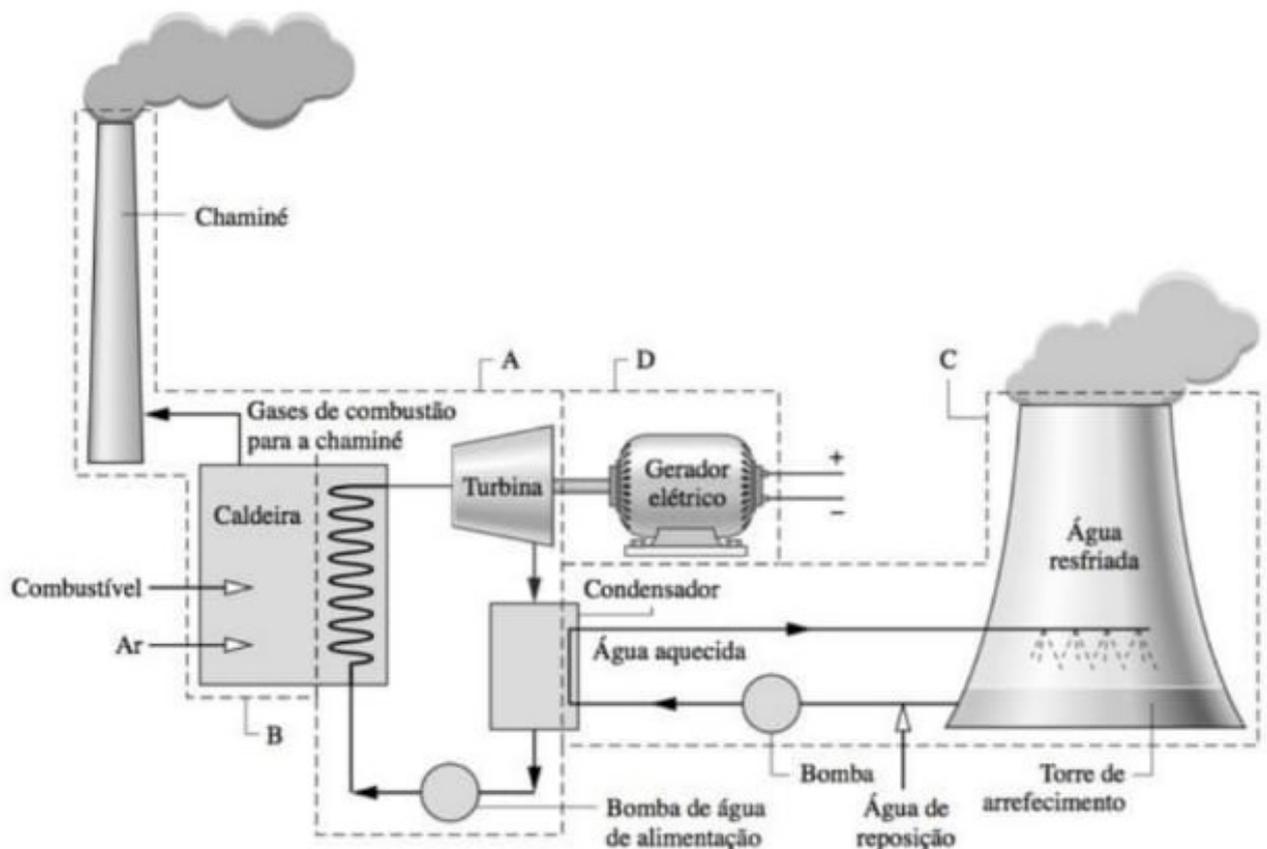
Não obstante, há ainda o Ciclo de Rankine, considerado como ideal das usinas de potência a vapor, pois é uma alternativa que possibilita a chamada recuperação de resíduos térmicos. Isso se dá por meio de um processo que utiliza o calor que normalmente é descartado por um sistema térmico e o transforma em energia útil (SILVA, 2021). Para tanto, tal ciclo exige quatro componentes que trabalham de forma interligada, como aponta Silva (2021) por onde ocorre a circulação do fluido de trabalho, quais sejam:

- Bomba - com finalidade de comprimir e bombear o fluido de trabalho, elevando sua pressão até o valor de pressão de operação da caldeira;
- Caldeira - ou gerador de vapor, que atua como um trocador de calor, e onde ocorre a transferência da energia térmica para o fluido de trabalho, elevando sua temperatura e fazendo o fluido de trabalho mudar para a fase de vapor;

- Turbina - componente no qual ocorre a produção de trabalho útil, por meio da expansão do fluido de trabalho;
- Condensador - onde ocorre a perda de calor pelo fluido de trabalho para algum meio de arrefecimento, fazendo o mesmo se condensar e voltar para a fase líquida, o que completa o ciclo.

A Figura 3 representa o modelo de um sistema fechado a vapor e a Figura 3 demonstra a aplicação prática do ciclo de Rankine.

Figura 3 - Componentes de uma instalação de potência a vapor (ciclo Rankine)



Fonte: Tordin et al. (2017).

Onde: O Ponto A apresenta o subsistema que contém turbina e bomba de água, onde ocorre a conversão da energia térmica em trabalho, por meio dos movimentos de suas hélices

O ponto B demonstra um subsistema que contém uma caldeira que fornece energia por meio de calor, proveniente de fonte externa, que é necessária para a transformação da água do estado líquido para o gasoso

O Ponto C representa o subsistema que faz o resfriamento do vapor de água que vem da turbina por meio de condensação e contém um condensador, ou torre de resfriamento, e bombas de alimentação em alguns casos.

O Ponto D importa no subsistema responsável por transformar o trabalho, proveniente das hélices da turbina, em energia elétrica, ou seja, o gerador elétrico

Silva (2021) explica que no ciclo ideal são desconsideradas as principais irreversibilidades e perdas que podem ocorrer em cada equipamento, permitindo um estudo mais simplificado do processo. Assim, o esquema representado na Figura 3, demonstra que a água flui, passando por quatro estados distintos os quais são apresentados pelos números de 1 a 4:

- **Estado 1:** se refere ao ponto de entrada do fluido na bomba, que para um ciclo ideal, admite-se ter as mesmas propriedades da saída do condensador;
- **Estado 2:** corresponde à saída da bomba, onde o fluido estará na fase de líquido comprimido, e, na entrada da caldeira;
- **Estado 3:** pontos de saída da caldeira e entrada da turbina, onde o fluido está na fase de vapor superaquecido ou vapor saturado;
- **Estado 4:** saída da turbina e entrada no condensador, onde se caracteriza pela pressão (pressão do condensador), e, após a condensação neste equipamento, o fluido volta ao Estado 1, reiniciando o ciclo.

Ainda sobre a Figura 3, Silva (2021) nota-se que em um ciclo ideal o fluido passa por uma sequência de quatro processos internamente irreversíveis, quais sejam:

- a) 1-2: compressão isentrópica em uma bomba;
- b) 2-3: fornecimento de calor à pressão constante em uma caldeira;
- c) 3-4: expansão isentrópica em uma turbina;
- d) 4-1: perda de calor a pressão constante em um condensador.

Em outros termos, o fluido entra pela bomba em fase de líquido saturado e nela se transforma em líquido comprimido, bombeado para a caldeira que recebe o calor. Na caldeira, recebendo calor o fluido é vaporizado passando, então, para a fase de vapor superaquecido. Em seguida, o vapor passa pela turbina onde se expande e a aciona, produzindo trabalho. Ao mesmo tempo, o vapor se transforma em mistura líquido-vapor saturado e, então, passa para o condensador. Já no condensador ocorre a rejeição de calor fazendo o fluido retornar para a fase de líquido saturado e assim reinicia o ciclo (SILVA, 2021).

Diante disso tem-se que enquanto a Primeira Lei da Termodinâmica se revela, sobretudo, no aspecto teórico, pois as irreversibilidades quando de processos reais sempre vão existir em menor ou em menor grau, a Segunda lei, que considera as irreversibilidades, é aplicável aos sistemas reais. De tal maneira é certo que a eficiência energética está relacionada à identificação e quantificação das irreversibilidades. A entropia, portanto, é tida como a medida da quantidade de energia térmica que não pode ser revertida em energia mecânica, isto é, o grau de declínio de energia útil, que participa da irreversibilidade desse processo, em uma determinada temperatura. A entropia constante é denominada de isentrópica (OLIVEIRA JÚNIOR et al, 2021).

Para o cálculo da eficiência energética são utilizadas as seguintes premissas: o levantamento das variáveis de projeto; a busca do processo ideal correspondente; e, a adoção da relação entre a energia oferecida e as irreversibilidades associadas ao processo (MARTINS, 2018).

A eficiência isentrópica, ou adiabática é o parâmetro adequado para expressar a proximidade do equipamento real e o projeto idealizado, na qual a pressão e o estado do fluido que entra na turbina são fixos, desprezando a transferência de calor entre a turbina e sua vizinhança, bem como os efeitos das energias potencial e cinética, de modo que os balanços de massa e energia se reduzem a:

$$\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \quad (5)$$

Onde: \dot{W}_{vc} : Potência;

\dot{m} : Vazão Mássica;

h_1 : Entalpia admissão;

h_2 : Entalpia extração.

A expressão que apresenta a geração da entropia, necessária devido às irreversibilidades, por sua vez, é a seguinte:

$$\frac{\dot{\sigma}_{vc}}{\dot{m}} = s_1 - s_2 \quad (6)$$

Onde: $\dot{\sigma}_{vc}$: Potência;
 \dot{m} : Vazão Mássica;
 s_1 : Entropia admissão;
 s_2 : Entropia extração.

Diante da ausência de irreversibilidades, ou seja, na expansão isentrópica através de uma turbina, tem-se:

$$\left(\frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}}\right)_s = h_1 - h_2 \quad (7)$$

Onde: \dot{W}_{vc} : Potência;
 \dot{m} : Vazão Mássica;
 h_1 : Entalpia admissão;
 h_2 : Entalpia extração.

Onde: s o indicativo de que o processo, ou a propriedade, é isentrópica.

Logo, a razão entre o trabalho resultante real da turbina e o trabalho resultante que seria alcançado se o processo entre o estado de entrada e a pressão de saída fosse isentrópico é a eficiência isentrópica:

$$\eta_T = \frac{w_r}{w_s} \approx \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_{2s}} \quad (8)$$

Onde: w_r : Trabalho real;
 w_s : Trabalho isentrópico
 h_{1r} : Entalpia admissão real;
 h_{2r} : Entalpia saída real;
 h_{1s} : Entalpia admissão isentrópico;
 h_{2s} : Entalpia saída isentrópico.

Onde: r representa que o processo ou a propriedade é real.

Ademais, é preciso calcular o título do vapor, já que conforme o avançar do fluido na turbina a redução da sua pressão e conseqüentemente a sua condensação, considerando que seja um processo isentrópico, para que se alcance a eficiência na condensação:

$$S = S_L + xv * (S_v - S_L) \quad (9)$$

Onde: S representa a entropia do vapor admitido na condensação
 S_L representa a entropia do líquido na pressão de condensação
 xv representa o título do vapor
 S_v representa a entropia do vapor saturado do vapor admitido na condensação

A partir do alcance do valor do título de vapor, há possibilidade de se chegar na entalpia (isentrópica) da condensação, utilizando a expressão:

$$H_s = H_L + xv * (H_v - H_L) \quad (10)$$

Onde: H_s significa a entalpia do vapor admitido na condensação (Isentrópico)
 H_L significa a entalpia do líquido na pressão de condensação
 H_v significa a entalpia do vapor saturado do vapor admitido na condensação
 xv significa o título do vapor (isentrópico)

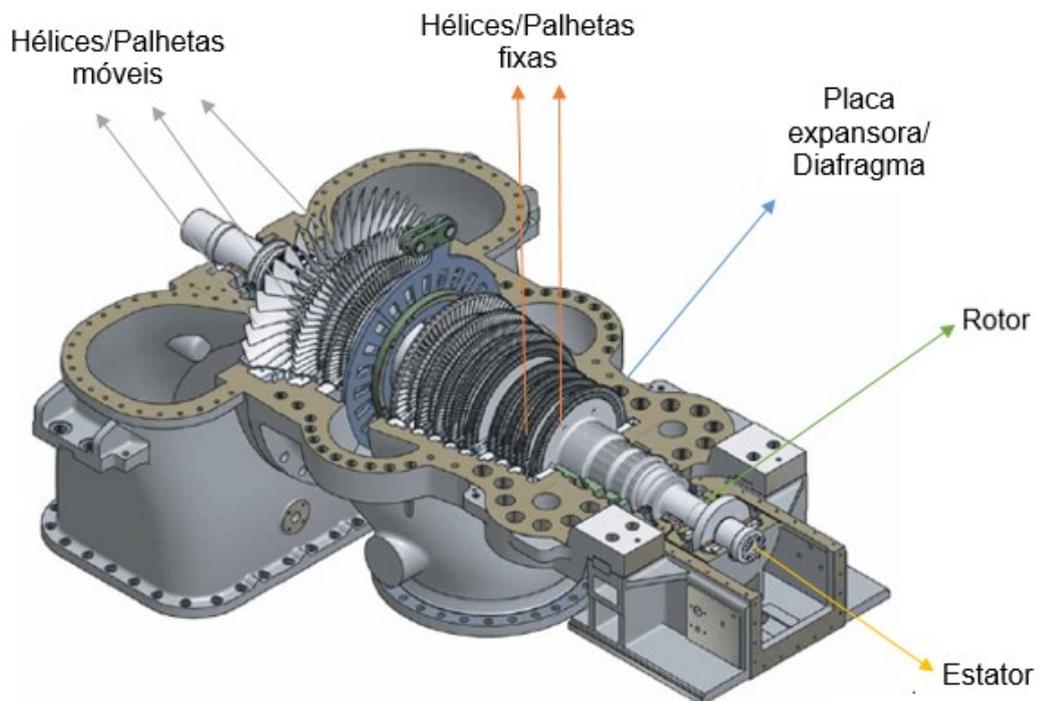
2.4 Turbinas à Vapor

As turbinas a vapor, ou turbo máquinas, transformam em energia rotacional mecânica a energia térmica que consta em um fluxo contínuo de fluido (SILVA; MORAIS, 2017). Em suma, pode-se dizer que a turbina a vapor promove a conversão da energia térmica do vapor em energia mecânica. Isso significa que tais turbinas são equipamentos com propriedade de retirar energia térmica do vapor pressurizado, a partir do elevado calor latente, na forma de potencial termodinâmico (LANZENDORF, 2018). Considerando que o complexo industrial objeto de estudo da pesquisa utiliza um ciclo fechado, ciclo de Rankine, onde o fluido sempre é reutilizado (desconsiderando vazamentos), e que se vale de turbinas a vapor para produção de energia mecânica, tais equipamentos devem ser compreendidos para a avaliação da eficiência energética proposta.

As turbinas a vapor, portanto, são sistemas de potência a vapor que utilizam alguma forma de energia para funcionar, como no caso, do aproveitamento de energia cinética. A turbina é elemento essencial para os sistemas de geração de calor a partir do vapor. Considerada um dos equipamentos mais versáteis, as turbinas a vapor são utilizadas de forma ampla em termelétricas, indústrias de processos em geral, propulsão marítima, usinas de álcool e açúcar de cana. O elemento básico desse equipamento é o rotor, que é composto de hélices, também denominadas de lâminas, cubos ou paletas, que podem ser fixas ou móveis, sistematizadas de maneira a propiciar uma força tangencial, impulsionando o rotor que, então, gira. Significa dizer que a energia mecânica está acoplada a um eixo, necessário para movimentação da máquina (RUFATO, 2020).

Logo, imprescindível apresentar a Figura 4, a qual representa uma turbina a vapor de condensação.

Figura 4 - Turbina a vapor de condensação



Fonte: TURBIVAP (2020).

A Figura 4, que representa a turbina a vapor de condensação, bem como aponta algumas de suas peças, permite vislumbrar que as palhetas possuem formato aerodinâmico, de modo que quando o vapor passa por ela, ocorre uma diferença de pressão. O vapor que entra na turbina, a uma determinada pressão e temperatura é direcionada para a placa expansora, ou diafragma, que orienta o fluxo do vapor pelas palhetas. Assim, as palhetas que estão ligadas ao rotor, quando sob pressão, irão girar o rotor. Entretanto, antes do vapor passar pelas palhetas, e assim movimentar o rotor, é preciso que o vapor se expanda a fim de aumentar a sua velocidade. Portanto, antes do vapor ser direcionado às hélices, ele vai para a placa expansora, ou diafragma, onde, a partir da restrição do fluxo de vapor, há aumento na velocidade cinética do vapor (SANTOS et. al, 2020).

No setor sucroalcooleiro, o sistema de cogeração com máquinas térmicas que tem destaque se vale das turbinas a vapor, que podem ser configuradas do seguinte modo: turbinas de contrapressão; a combinação de turbinas de contrapressão com outras de condensação que empregam o fluxo excedente; e turbinas de extração-condensação. Isso porque, para garantir as necessidades de energia térmica do sistema, é imprescindível a condensação de uma parte do vapor de escape, ou, de uma extração de vapor de uma turbina, conforme a finalidade da geração de energia, bem como as características de produção de energia do cogerador (PASSOLONGO, 2011).

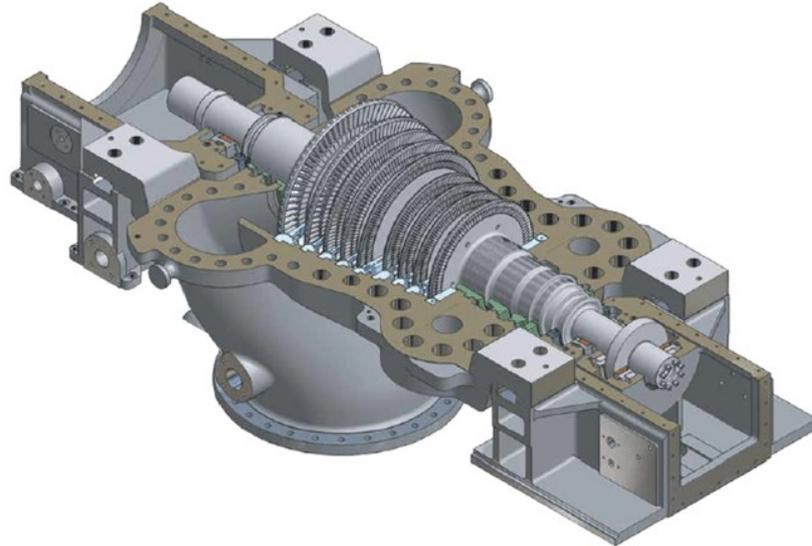
Com efeito, as diferentes condições do sistema térmico de cogeração de energia, em cada caso, apresentam condições específicas que podem influenciar diretamente no consumo de vapor, como a qualidade da cana esmagada, a vazão de caldos, entre outros, podendo gerar modificações no balanço térmico. Isso impacta diretamente o consumo e a taxa de retorno de vapor para a planta, podendo ocorrer falta ou sobra de vapor. Tais impactos podem gerar grandes danos ao equipamento (LEITE, et al., 2017).

A partir disso, pode-se dizer que as turbinas a vapor de condensação, representadas pela figura 4, aproveitam ao máximo a energia potencial do vapor que, por sua vez, em pressão menor que a atmosférica, isto é, vácuo, é direcionado ao condensador já em estado líquido, não sendo mais aproveitável para a produção de energia (SANTOS et. al., 2020).

De outro modo, as turbinas a vapor de contrapressão permitem que o vapor de saída da turbina ainda contenha energia suficiente para a alimentação de outros processos industriais, ou seja, um sistema de cogeração, onde há geração conjunta de energia elétrica e energia térmica provenientes de uma única fonte de combustível com vapor de saída com pressão maior que a

atmosférica (TAVARES, 2019). A Figura 5, a seguir, representa uma turbina a vapor de contrapressão.

Figura 5 - Turbina a vapor de contrapressão



Fonte: TURBIVAP (2020).

Não obstante, as turbinas a vapor, sejam elas de condensação ou de contrapressão, também são classificadas como: com extração de vapor ou sem extração de vapor. Tal extração de vapor acontece da seguinte forma: com alta entalpia, o vapor entra na turbina, e, após alguns estágios parte do vapor sai da turbina, sendo direcionado para o processo. Já a parte que ficou na turbina se expande até a saída pelo escape (TAVARES, 2019).

As turbinas a vapor atuais também podem ser classificadas em turbinas de ação, turbinas de reação e turbinas de ação e reação. As turbinas de reação são aquelas em que a expansão do vapor se dá apenas nos órgãos fixos que são constituídos de injetores ou palhetas fixas. Já as turbinas de reação se enquadram as que também têm expansão do vapor no rotor, de modo que a pressão na entrada do vapor é maior do que na saída. Por fim, as turbinas de ação e reação são as consideradas mistas, construídas de forma que a parte inicial é de alta pressão voltada para ação e sua outra parte é de baixa pressão, com fulcro para reação (SILVA; MORAIS, 2017).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho é um estudo de caso. Conforme explicam Andrade et. al (2017), estudo de caso corresponde a um método de pesquisa, estruturado de maneira a contribuir com o conhecimento, englobando fenômenos individuais ou grupais. Os mesmos autores ainda informam que o estudo de caso possui características próprias, pois cada caso pode se dar em diferentes condições e situações, com foco na busca por respostas para o problema da investigação.

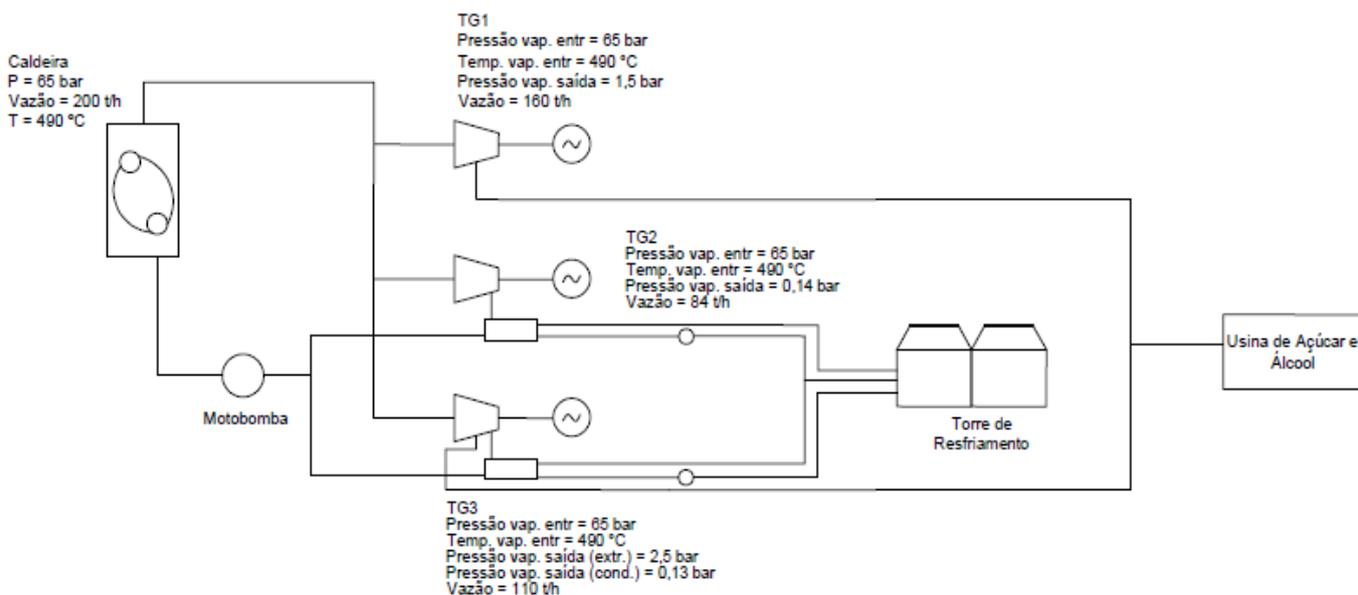
A usina termoeétrica escolhida para desenvolvimento deste trabalho possui uma boa atuação na região de Goianésia, município que se encontra no Estado de Goiás. Visando a abordagem de uma pesquisa exploratória, com foco quantitativo, os dados foram coletados por um *software* do setor de instrumentação e automação da usina termoeétrica escolhida, incluindo elementos de temperatura e pressão dos turbogeradores existentes para o desenvolvimento dos cálculos de eficiência. Além disso, foi utilizada como fonte a base de dados desenvolvida pela empresa em questão por meio do Microsoft Excel, para o controle e elaboração de relatórios para a gerência e diretoria do grupo no Brasil e na França. Tal fonte tem o objetivo de apresentar os dados de consumo de vapor e a produção de energia elétrica. Houve também, extensa pesquisa em referencial teórico, buscando conteúdo sobre sustentabilidade e sua relação com a engenharia mecânica, transformação de energia elétrica pelo bagaço-de-cana, processo industrial, turbinas a vapor, conceitos termodinâmicos, estrutura dos turbogeradores em artigos científicos, livros, revistas científicas.

Não obstante, também foram realizadas pesquisas para a comprovação de métodos de eficiência nas turbinas à vapor. A criteriosidade para a organização e seleção de dados são abordados de forma a evidenciar os valores necessários para a busca de resultados, além de não expor os dados que são sigilosos para a empresa localizada em questão, assegurando a confiança entre ambas as partes. A partir disso foi possível a realização dos cálculos, criação de gráficos e tabelas, para que, por fim, se alcançasse a resposta ao problema proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O site industrial escolhido para análise nesta pesquisa é composto de uma caldeira de alta pressão, com 65 bar e, aproximadamente, 200 t/h de vazão de vapor “vivo”. Esse vapor “vivo” é inserido nas três turbinas. A primeira, com o modo de contrapressão, tem pressão de saída por volta de 1,5 – 2,5 bar. A segunda, com o modo de condensação, tem pressão de saída de 0,14 bar. A terceira, que possui o modo de extração com 2,5 bar, e condensação com 0,13 bar, sendo que essa turbina possui dois modos de operação, de forma que o modo é ajustado conforme a necessidade de vapor para o processo da usina sucroalcooleira. Conforme apresentado pela figura 6.

Figura 6 - Layout Simplificado do Processo de Cogeração de Energia na Planta Termoeletrica



Fonte: Autor.

Cada equipamento possui uma vazão diferente. O Turbo Gerador 1, o TG1, possui, em média, 160 t/h de consumo de vapor. O TG2 possui uma média de 84 t/h. O TG3 possui consumo médio de 110 t/h. Nota-se que as turbinas que possuem modo de condensação têm um menor consumo de vapor, já que a finalidade desse equipamento é apenas realizar o trabalho nas turbinas convertendo energia térmica em energia mecânica, através das paletas rotativas transmitindo o trabalho gerado ao eixo para a geração de energia elétrica, e, em seguida vai para

o condensador para retornar ao ciclo do gerador de vapor. O TG1 e TG3 modo extração necessitam de maior vazão, pois a pressão do vapor logo que passa pelas paletas rotativas, vai para os processos da usina parceira, para dar continuidade nos processos de açúcar e álcool.

Recentemente, no ano de 2020, houve a produção de 173 GWh de energia elétrica nesta mesma termoelétrica. O consumo médio mensal, segundo a (EPE, 2020) , uma residência na região do Centro-Oeste, no ano de 2019, possuía consumo de 187,4 kWh/mês, sendo que essa foi a região que apresentou o maior consumo residencial no Brasil. Pode-se afirmar que, em um ano de operação, a termoelétrica conseguiria manter, anualmente, o fornecimento de energia elétrica de aproximadamente 77.000 residências na região do Centro-Oeste.

4.1 Obtenção de dados

Primeiramente, foi solicitado ao responsável pelo setor de instrumentação e automação da empresa estudada a disponibilização dos dados de pressão e temperatura dos turbogeradores através de *software* de controle. Optou-se, preferencialmente, por dados coletados do ano de 2021, pois teria maior tempo da instalação e comissionamento do turbogerador 3, pois pressupõe-se que o equipamento está estável e adaptado ao modo operacional do processo inserido em relação aos dados iniciais de seu funcionamento. A partir dessa coleta, foi possível estabelecer um estudo de caso das eficiências das turbinas. Além disso, os valores disponibilizados são de operações reais em que a usina termoelétrica necessitou para o fornecimento de vapor e energia que foram direcionados para a usina de açúcar e álcool parceira, além de manter a estabilidade do seu objetivo real que é a exportação de energia para linha de transmissão da concessionária local.

Houve a necessidade de realizar a média dos valores, pois os mesmos foram disponibilizados com a variável de tempo em horas, no caso do TG1 e TG3, e, o tempo em minuto, no caso do TG2. Como o ressaltado dos dados obtidos não são todos do mesmo intervalo de período, já que apenas duas turbinas podem funcionar simultaneamente. Portanto, os dados que se referem às turbinas do TG1 e TG3, que funcionaram simultaneamente ao longo de mais da metade da safra, possuem disponibilidade de datas parecidas. Porém, o TG2, que obteve pouca disponibilidade no período de safra estudado, até a data de coleta, possuía menor intervalo de períodos de operação, conforme mostrados a seguir nas tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 1

Dados Reais TG1				
Data	Pressão Admissão TG1 (Bar)	Temperatura Admissão TG1 (°C)	Pressão Extração TG1 (Bar)	Temperatura Extração TG1 (°C)
05/05/2021	66,1203580	478,8161912	1,5781586	135,7545180
06/05/2021	66,0606451	479,3018113	1,5711799	135,7046884
07/05/2021	65,9673978	479,1453008	1,5874354	136,0342340
08/05/2021	66,0759886	479,4470114	1,6044547	137,0015047
09/05/2021	66,2139595	479,5333531	1,5928155	136,8073701

Fonte: Autor

Tabela 3 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 2

Dados Reais TG2				
Data	Pressão Admissão TG2 (Bar)	Temperatura Admissão TG2 (°C)	Pressão Condensação TG2 (Bar)	Temperatura Condensação TG2 (°C)
01/04/2021	63,99753654	481,4945784	-0,657677044	64,03182418
02/04/2021	64,25090006	481,6988471	-0,648582527	65,01719065
03/04/2021	64,37108463	481,2083192	-0,648830395	65,08470492
04/04/2021	64,06453245	480,9289016	-0,647734272	65,1304905
05/04/2021	63,88796487	482,9874258	-0,659027231	63,99716614

Fonte: Autor

Tabela 4 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 3

Dados Reais TG3				
Data	Pressão Admissão TG1 (Bar)	Temperatura Admissão TG1 (°C)	Pressão Extração TG1 (Bar)	Temperatura Extração TG1 (°C)
05/05/2021	65,7326128	478,5023503	1,4134687	180,0304949
06/05/2021	65,6517955	479,1482449	1,4321337	178,3029857
07/05/2021	65,6079680	478,9489844	1,3530132	180,1839310
08/05/2021	65,7265916	479,3201699	1,4398798	181,9133193
09/05/2021	65,8649058	479,5076047	1,4260720	180,7802464

Fonte: Autor

Em seguida, foi solicitado ao setor de operações e da engenharia, os dados de projeto dos TG's, através dos manuais de operação e manutenção. Os TG's 1 e 2, tabela 5 e 6 respectivamente, foram fabricados pelo mesmo fornecedor, e são as turbinas que já estavam

instaladas e operando no site antes da aquisição da terceira turbina. Assim, o TG3 (tabela 7), último instalado, não possui o mesmo fornecedor que os dois primeiros.

Com a obtenção destes dados, foi possível prosseguir com a realização do estudo de caso, a fim de calcular a eficiência dos turbogeradores.

Tabela 5 - Dado de projeto do Turbogenerador 1

1.2 – CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA TURBINA

Máquina acionada	Gerador						
	Crítica		Normal		Máxima		
Pontos							
Potência nos bornes do gerador	9,7	4,8	19,8	10,4	20,0	10,5	MW
Pressão do vapor de entrada	63	63	65	65	66	65	Bar (a)
Temperatura do vapor de entrada	480	480	490	490	495	495	° C
Vazão do vapor de entrada	38.000	20.000	75.000	40.000	75.000	40.000	kg/h
Pressão do vapor de saída	0,08	0,05	0,14	0,08	0,14	0,08	Bar (a)
Vazão de vapor de saída	38.000	20.000	75.000	40.000	75.000	40.000	kg/h
Consumo específico	3,92	4,17	3,79	3,84	3,75	3,81	Kg/kWh
Rotação da turbina	6000	6000	6000	6000	6000	6000	Rpm
Rotação do gerador	1800	1800	1800	1800	1800	1800	Rpm
Tolerância	3	3	3	3	3	3	%
Garantia					X		

Fonte: Manual De Instruções TM 25000 A - TGM Turbinas.

Tabela 6 - Dado de projeto do Turbogenerador 2

1.2 – CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA TURBINA

Máquina acionada	Gerador						
	Crítica		Normal		Máxima		
Pontos							
Potência nos bornes do gerador	9,7	4,8	19,8	10,4	20,0	10,5	MW
Pressão do vapor de entrada	63	63	65	65	66	65	Bar (a)
Temperatura do vapor de entrada	480	480	490	490	495	495	° C
Vazão do vapor de entrada	38.000	20.000	75.000	40.000	75.000	40.000	kg/h
Pressão do vapor de saída	0,08	0,05	0,14	0,08	0,14	0,08	Bar (a)
Vazão de vapor de saída	38.000	20.000	75.000	40.000	75.000	40.000	kg/h
Consumo específico	3,92	4,17	3,79	3,84	3,75	3,81	Kg/kWh
Rotação da turbina	6000	6000	6000	6000	6000	6000	Rpm
Rotação do gerador	1800	1800	1800	1800	1800	1800	Rpm
Tolerância	3	3	3	3	3	3	%
Garantia					X		

Fonte: Manual De Instruções TMC 25000 A - TGM Turbinas.

Tabela 7 - Dado de projeto do Turbogenerador 3

1. DESCRIÇÃO GERAL DO FORNECIMENTO

1.1. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Rotação da turbina.....	6.493 rpm
Rotação normal do gerador.....	1.800 rpm
Equipamento acionado	Gerador
Potência nos bornes do gerador	24.164 kW _e

Condição de Vapor	Normal	Unidades
Pressão de admissão	65,0	bar (a)
Temperatura de admissão	480	°C
Pressão de sangria n°1	15,0	bar (a)
Pressão de sangria n°2	6,0	bar (a)
Pressão de extração	2,5	bar (a)
Pressão de escape (*)	0,13	bar (a)
(*) Pressão limitada em função da área (superfície de troca térmica) do condensador existente.		

Fonte: Manual De Instruções Instalação, Operação e Manutenção, Volume 1/3, HC-800 E - NG METALÚRGICA.

Para a segunda parte dos cálculos, obteve-se acesso à base de dados desenvolvida pela empresa, utilizando o *software* Microsoft Excel, para o controle e elaboração de relatórios direcionados às gerências e diretoria do grupo no Brasil, bem como na França, onde a empresa possui os dados de quantidade em toneladas de vapor admitido, e, também, os dados de produção de energia em MW por dia, nas três turbinas, entre os anos de 2018 e 2021. Com esses dados há possibilidade de comparar as turbinas entre si, enxergando, com outro tipo de variável, qual delas é a mais eficiente em relação a geração de energia, ou seja, qual a quantidade de toneladas de vapor admitida no bocal de cada turbogenerador é necessária para produzir 1 MW de energia.

4.2 Cálculos

Para dar início nos cálculos, é imprescindível conhecer o tipo de turbina à vapor em exame, já que na usina termoelétrica estudada há três tipos. O TG1 é uma turbina de

contrapressão, o TG2 é uma turbina de condensação, e, por fim, o TG3 é uma turbina de extração-condensação.

Como a intenção é realizar os cálculos a partir de operações reais apresentadas na indústria estudada, os valores de condensação para a TG3 não contabilizaram para o estudo, já que o modo de extração do equipamento é o mais utilizado para o melhor funcionamento do processo industrial. Por esse motivo, a eficiência do turbogerador 3 será calculado através do modo de extração.

Para a realização dos cálculos necessários para a verificação da possibilidade de melhoria da eficiência energética, da termoelétrica em exame, a partir da nova turbina, houve a necessidade de utilizar as tabelas termodinâmicas (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018) conforme o Amexo B. Para calcular a eficiência de extração das turbinas 1 e 3, foi utilizada a equação 8, e, de condensação, da turbina 2, foi utilizada a mesma equação. Contudo, foi necessário calcular antes o título de vapor, como discutido anteriormente o vapor é condensado ao longo da turbina devido a perda de pressão, equação 9 e 10, pois o processo foi considerado isentrópico. Os valores apresentados não são do mesmo período, como mencionado anteriormente, e tendo em mente que apenas duas turbinas podem operar simultaneamente, foram obtidos os valores a seguir.

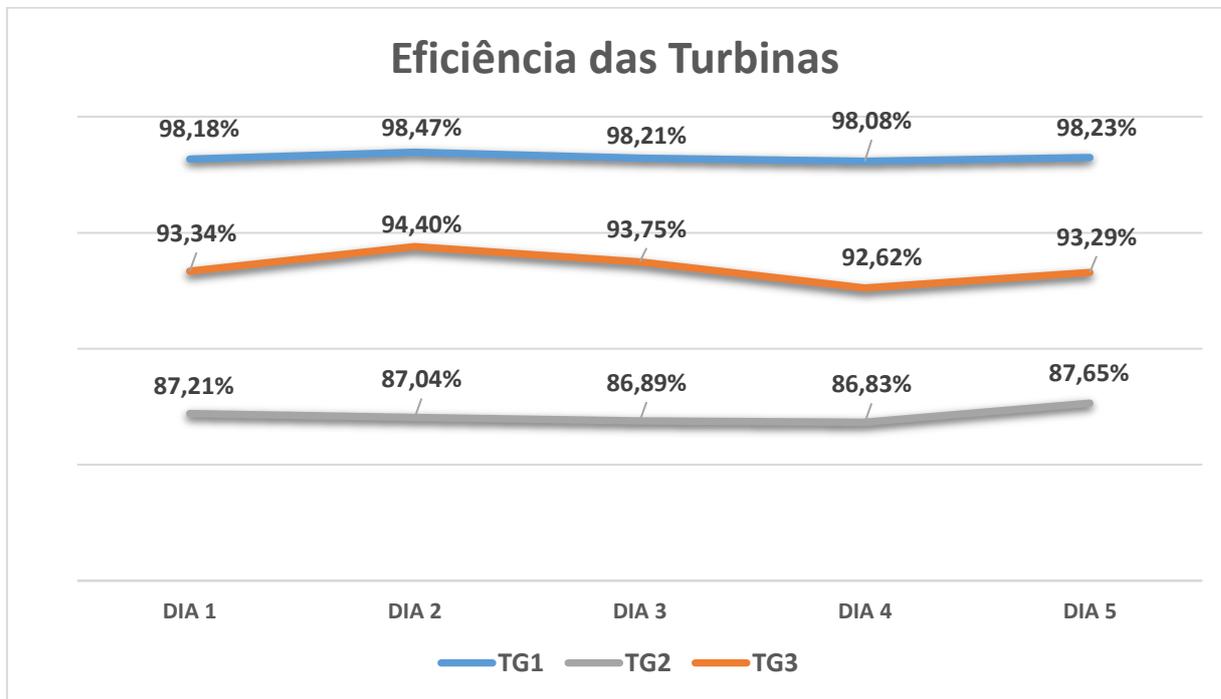
Tabela 8 - Valores diários e média da eficiência das turbinas

Data Calculada	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	
Turbinas	05/05/2021	06/05/2021	07/05/2021	08/05/2021	09/05/2021	Média
TG1	98,18%	98,47%	98,21%	98,08%	98,23%	98,23%
TG3	93,34%	94,40%	93,75%	92,62%	93,29%	93,48%
Turbinas	01/04/2021	02/04/2021	03/04/2021	04/04/2021	05/04/2021	Média
TG2	87,21%	87,04%	86,89%	86,83%	87,65%	87,12%

Fonte: Autor.

Para melhor visualização, os valores foram apresentados em gráfico de linha. Foi observado que o valor do TG1 se destacou em relação aos outros dois, já que esse equipamento está operando com condições de pressão e temperaturas reais, bem próximas aos valores do projeto da turbina. Portanto, pode-se afirmar que, quanto menor for a diferença de valores de admissão e extração ou condensação da entalpia real, em relação aos valores das mesmas variáveis de entalpia de projeto, o equipamento terá uma eficiência maior, conforme demonstrado no gráfico abaixo.

Gráfico 1 - Eficiência das turbinas.



Fonte: Autor

Com os valores médios apresentados por cada turbina, em relação aos 5 dias em que foram coletados os dados, conforme a tabela 8, foi realizada nova média aritmética, entre a probabilidade destes três valores médios encontrados, para expor se, com a instalação do novo turbogerador (TG3), conforme apresentado na tabela 9, houve melhor eficiência energética na usina termoeétrica. Seguem, abaixo, os resultados médios das possíveis combinações de eficiências dos turbogeradores em operação real no site da termoeétrica.

Tabela 9 - Médias das combinações de eficiências dos turbogeradores

TG1+TG2	TG1+TG3	TG2+TG3
92,68%	95,86%	90,30%

Fonte: Autor.

Com os resultados apresentados acima, evidenciou que a maior eficiência alcançada na termoeétrica foi a operação conjunta dos turbogeradores 1 e 3, com o valor de 95,86%. Em

seguida, a combinação dos turbogeradores 1 e 2, com o resultado de 92,68%. Por fim, a combinação dos valores dos turbogeradores 2 e 3, com o saldo de 90,30%. A análise dos valores, a partir dos dados apresentados até o ano de 2018, período anterior a instalação e comissionamento do terceiro equipamento, demonstra que a eficiência alcançada pela usina termoeétrica era menor do que após a instalação da terceira máquina. Ressalta-se, que, até então, havia apenas a possibilidade de operação simultânea do TG1 e TG2.

A abordagem do segundo método permite visualizar a quantidade necessária, em média, de consumo de toneladas de vapor para geração de 1MW de energia elétrica. Assim, é possível evidenciar qual turbina é mais eficiente ao necessitar de menos matéria-prima. No caso em exame, tal matéria-prima é o vapor superaquecido, do qual é absorvida a energia proveniente da queima do bagaço-de-cana e palha na caldeira, para a produção de quantidade “x” de energia elétrica.

Foi analisado o total de dados imputados em torno de 1100 dias, desde o início do ano de 2018 até o primeiro semestre de 2021. Tais valores foram coletados pela empresa desde antes da instalação do TG3 até o presente ano, sendo que a operação dessa turbina, pelo primeiro método de resultados, mostra que é essencial para a termoeétrica. Para evitar a exposição de dados gerenciais de consumo e produção, pois os mesmos são oficiais e refletem a disponibilidade da operação dos equipamentos, gerando riscos de lesão à empresa com a divulgação desse tipo de informação, a pesquisa apresenta, apenas, o resumo dos valores que foram coletados, a fim de evitar transtornos entre as partes.

A tabela evidencia dados anuais de toneladas de vapor admitidos na turbina, e, dados de energia elétrica produzidas pelo turbogerador como uma pequena parte destinada ao consumo próprio da usina termoeétrica e da usina de açúcar e álcool parceira, e, o restante, é direcionado à exportação de energia elétrica para concessionária atuante na região, a ENEL.

Tabela 10 - Razão de dados anuais de produção de vapor e geração de energia elétrica por turbina.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Data	Pr.EletricTG1 (MWh)	Pr.EletricTG2 (MWh)	Pr.EletricTG3 (MWh)	Pr.Vap_ TG1 (t)	Pr.Vap_ TG2 (t)	Pr.Vap_ TG3 (t)	Pr.Vap_TG1/ Pr.EletricTG1 (MWh/t)	Pr.Vap_TG2/ Pr.EletricTG2 (MWh/t)	Pr.Vap_TG3/ Pr.EletricTG3 (MWh/t)
2018	361,0	409,6	0,0	2111,7	1691,8	0,0	6,0	4,2	
2019	293,5	186,6	213,9	1738,3	782,6	937,5	6,0	4,2	4,4
2020	400,1	97,1	283,7	2319,5	426,4	1331,8	5,8	4,4	4,8
2021	10,5	269,6	239,4	62,8	1128,2	1091,2	5,6	4,3	4,6
Média	266,3	240,7	184,3	1558,1	1007,2	840,1	5,9	4,2	4,6

Fonte: Autor

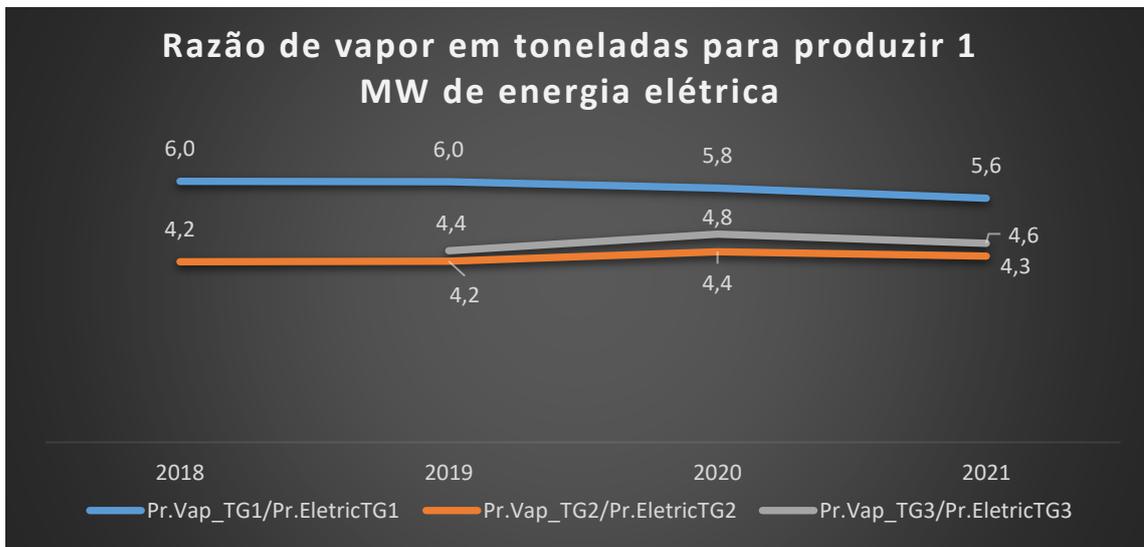
Os dados apresentados nas colunas de cor amarela (coluna 2, 3 e 4) evidenciam os valores de energia elétrica produzida pelos TG1, TG2 e TG3 em MW, respectivamente. Já os dados das colunas azuis (coluna 5, 6 e 7) evidenciam os valores de vapor admitidos na entrada de cada uma das turbinas, em toneladas e por fim os dados das colunas em verde (coluna 8, 9 e 10) mostram a razão entre o vapor admitido na entrada e energia elétrica produzida de cada uma das turbinas. Além disso, na última linha da tabela mostra o valor médio de cada variável respectivamente.

Com isso, verifica-se que o valor médio das duas primeiras variáveis do TG3 é menor do que os demais TG's, pois os valores da mesma foram contabilizados a partir do ano de 2019, quando a operação efetiva da turbina se iniciou na termoelétrica. Porém, os dados mais relevantes para o estudo de caso são os valores apresentados nas colunas verdes, as quais apontam a razão entre o vapor admitidos na entrada e a energia elétrica produzida de cada turbina. Ressalta-se que, quanto menor o valor apresentado nessas colunas, mais eficiente é a turbina para geração de 1MW.

O exame de tais valores permitiu concluir que o TG2 é o mais eficiente das turbinas, apesar de apresentar os menores resultados de eficiência isentrópica (primeiro método). Em seguida, a “nova” turbina TG3 aparece em 2º lugar, necessitando de 4,6 toneladas de vapor, em média, para a geração de 1MW de energia elétrica. Por fim, a turbina menos eficiente é a TG1, necessitando de 6 t, em média, de vapor, para a geração de 1MW de energia elétrica.

Para melhor visualização da evolução dos valores apresentados por ano, foi desenvolvido o gráfico apresentado a seguir.

Gráfico 2 - Razão de vapor, em toneladas, para produzir 1MW de energia elétrica.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados no primeiro método, demonstram que o turbogerador 3 apresenta uma eficiência inferior, a 4,84%, em relação ao turbogerador 1, mas, se sobressai em relação ao turbogerador 2, quando a eficiência é superior a 7,30%. Além disso, a combinação de operação das turbinas TG1+TG3 possui eficiência média superior, de 3,43%, em relação ao layout de operação anterior a instalação do TG3, ou seja, a operação simultânea do TG1+TG2. Com isso, comprova-se que a instalação da turbina TG3 trouxe um maior ganho de eficiência energética para a usina termoeletrica.

Pelo segundo método, observou-se que, para produzir 1MW de energia elétrica, o TG3 necessita de, em média, 22,03% menos consumo de vapor em toneladas, em relação a turbina TG1. Porém, quando se compara com o TG2, a mesma turbina, precisa consumir 9,52% de vapor em toneladas a mais para produzir a mesma quantidade. Apesar da “nova turbina” não se sobressair a todos os critérios avaliados em relação às duas turbinas já existentes no site, os dois critérios analisados na presente pesquisa evidenciam que houve uma melhoria na eficiência energética da termoeletrica após a instalação do TG3. Portanto, comprova a ideia do estudo de caso.

Para incremento dos estudos desta pesquisa, sugere-se a elaboração de novo projeto do site, com a adição de mais um gerador à vapor (Caldeira) para aumentar a quantidade de vapor produzido, e, com isso, permitir a operação das três turbinas concomitantemente, podendo gerar mais energia elétrica para exportação. Além disso, seria interessante realizar o levantamento do consumo de vapor, entregue da usina termoeletrica para a usina parceira, a fim de identificar se há vapor sendo desperdiçado na operação de açúcar e álcool, ao invés de proporcionar maior ganho de produção, na central termoeletrica de energia.

Diante do exposto, a resposta para o problema proposto, alcançado por meio da realização desta pesquisa, é: a partir de estudos termodinâmicos, foi possível afirmar que houve melhoria da eficiência energética, com a implantação de uma nova turbina, na termoeletrica localizada no interior do estado de Goiás em análise. Contudo, é possível ampliar ainda mais sua eficiência na medida em que as três turbinas existentes não podem funcionar simultaneamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL)-ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>. Acesso em 01 dez. 2021.

AGRA, Walber de Moura. **Curso de direito constitucional**. 9. ed. Belo Horizonte: Fórum, 2018.

ANDRADE, Selma Regina de et al. O estudo de caso como método de pesquisa em enfermagem: uma revisão integrativa. **Texto & Contexto-Enfermagem**, v. 26, 2017. Disponível em <https://www.scielo.br/j/tce/a/8fLRLYFMZLVwT3BxBHCJRSs/?lang=pt&format=html>. Acesso em 30 nov. 2021.

ARAÚJO, Alana Ramos. Racionalidade, sustentabilidade e novas perspectivas para a tutela jurídica do meio ambiente. **De Sevilla a Filipéia**, 2021. Disponível em <http://plone.ufpb.br/ccj/contents/pdf/de-sevilla-a-filipeia-livro-em-homenagem-ao-prof-marcos-augusto-romero.pdf#page=110>. Acesso em 04 nov. 2021.

ARAÚJO, Geraldo Jose Ferraresi de; RONQUIM FILHO, Adhemar. A utilização do bagaço de cana de açúcar para a geração de energia elétrica: o estudo de caso em uma usina sucroenergética de grande porte. **Revista de Agronegócio – Reagro, Jales**, v.7, n.2, p. 17-29, jul./dez., 2018. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Gerado-Araujo/publication/335703279_A_UTILIZACAO_DO_BAGACO_DE_CANA_DE_ACUCAR_PARA_A_GERACAO_DE_ENERGIA_ELETRICA_O_ESTUDO_DE_CASO_EM_UM_A_USINA_SUCROENERGETICA_DE_GRANDE_PORTE/links/5d76a122a6fdcc9961bc9526/A-UTILIZACAO-DO-BAGACO-DE-CANA-DE-ACUCAR-PARA-A-GERACAO-DE-ENERGIA-ELETRICA-O-ESTUDO-DE-CASO-EM-UMA-USINA-SUCROENERGETICA-DE-GRANDE-PORTE.pdf. Acesso em 10 nov. 2021.

BARROS, Benjamim.Ferreira. D.; BORELLI, Reinaldo.; GEDRA, Ricardo. L. Eficiência Energética - Técnicas de Aproveitamento, **Gestão de Recursos e Fundamentos**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518404/>. Acesso em: 23 out. 2021.

BEATO, Lucas Boacnin. Uso de motores Stirling para recuperação de energia em propulsores navais: Avaliação da sustentabilidade. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em:

<http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22240/3/UsoMotoresStirling.pdf>. Acesso em 30 out. 2021.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.. **Fundamentos da termodinâmica [livro eletrônico]**. 8ª. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 730 p. Disponível em: <file:///D:/Download%20-%20Disco%20D/Fundamentos%20da%20Termodin%C3%A2mica%20by%20Claus%20Borgnakke,%20Richard%20E.%20Sonntag%20(z-lib.org).pdf>. Acesso em: 01 dez. 2021.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 235/2006**. Estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia e dá outras providências. Disponível em https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-normativa-235-2006_103586.html. Acesso em 10 nov. 2021.

BRASIL. **Constituição da república federativa do brasil**, de 05 de outubro de 1988. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso 30 nov. 2021.

BRASIL. Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966. Regula o exercício das profissões de Engenheiro, Arquiteto e Engenheiro-Agrônomo, e dá outras providências. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L5194.htm. Acesso em 30 nov. 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Oferta de Biocombustíveis**. Publicação em out. 2021. Brasília, Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis; 2021. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-e-epe-divulgam-estudo-sobre-oferta-de-biocombustivei/PDE2031OfertadeBiocombustiveis.pdf>. Acesso em 10 nov. 2021.

CARVALHO, Jeferson Moreira de. **Meio ambiente: sadia qualidade de vida**. São Paulo: Letras Jurídicas, 2013.

CASTRO, B. S. et al. Análise da influência da umidade do bagaço de cana-de-açúcar na cogeração de energia elétrica. 2020. **Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais: Uniube-UFTM-IFTM**. Uberaba, 11 e 12 de Dezembro de 2020. Disponível em <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/1442/1/download%20%284%29.pdf>. Acesso em 10 nov. 2021.

CHATOSKI, Yara Carina Vieira et al. Geração de energia por meio do lixo orgânico e esgoto promovendo a sustentabilidade. **Anais do EVINCI-UniBrasil**, v. 6, n. 1, p. 140-140, 2020. Disponível em <https://portaldeperiodicos.unibrasil.com.br/index.php/anaisvinci/article/view/5509/4578>. Acesso em 04 nov. 2021.

CONFEA- Conselho Federal de Engenharia e Agronomia. **Código de Ética do Profissional da Engenharia, da Agronomia**, da Geologia, da Geografia e da Meteorologia. Brasília, 26 de novembro de 2002. Disponível em https://portal.crea-sc.org.br/wp-content/uploads/2019/07/10edicao_codigo_de_etica_2018.pdf. Acesso em 04 nov. 2021.

DOMINGUES, Marcela Alves. **Análise exergética de uma planta de cogeração híbrida solar/biomassa**. Repositório Institucional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (RIUT). Publicação em 04 dez 2020. Guarapuava-PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020. Disponível em <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/23622>. Acesso em 10 nov. 2021.

DOS SANTOS, Mariana et al. Educação Ambiental Como Ferramenta Para A Formação Crítica Dos Engenheiros Mecânicos. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**. Edição Especial, v. 11, n.2, p. 34-45, 2020. Disponível em: <https://revistapos.cruzeirodosul.edu.br/index.php/rencima/article/view/2708/1240>. Acesso em 27 maio 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. Anuário estatístico de energia elétrica 2020 - Ano base 2019. Rio de Janeiro, Empresa de Pesquisa Energética: 2021. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/EPEFactSheetAnuario.pdf>. Acesso em 30 set 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Eficiência Energética**. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>. Acesso em 20 abr. 2021.

GARCIA, Leonardo Medeiros. **Direito ambiental**. 9. ed. rev., atual. e ampl. Salvador: Juspodivm, 2016.

LANZENDORF, Jonas Zin. Estudo da influência da temperatura sobre o processo de rebitagem em palhetas de turbinas a vapor. **Repositório Institucional SATC**. Mecânica dos Sólidos, Plasticidade, Simulação Numérica Estrutural, 2018. Disponível em <http://repositorio.satc.edu.br/handle/satc/342>. Acesso em 13 nov. 2021.

LEITE, LMF; LIMA, EAP DE; CHESCA, A. C. Estudo para otimização do balanço térmico de vapor de uma indústria sucroalcooleira. 2017. **I Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais**. Uberaba (MG), 01 e 02 dez. 2017. Disponível em <https://repositorio.uniube.br/handle/123456789/889>. Acesso em 25 nov. 2021.

MACIEL, Carlos Renato França. Análise energética e exérgica de uma central termelétrica. **Tese**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2004. Disponível em http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_MacielCR_1.pdf. Acesso em 06 nov. 2021.

MARTINS, Daniela Lima. Cálculo da eficiência de turbogeradores de uma planta de ácido sulfúrico. **Monografia**. Engenharia Química na Universidade de Uberaba: Uberaba, 2018.

MELO, Murilo Borri. Avaliação da redução do consumo de vapor em uma usina do setor sucroalcooleiro utilizando a metodologia de análise pinch. 2020. **Repositório Institucional UFSCar**. Publicado 14 dez. 2020. São Carlos-SP, 2020. Disponível em <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13681>. Acesso em 11 nov. 2021.

MIRANDA, Juliana. Dados ambientais alarmantes. **Grupo Escola**: Início: Geografia: Dados Ambientais Alarmantes. Publicado em nov. 2021. Disponível em <https://www.grupoescolar.com/pesquisa/dados-ambientais-alarmantes.html>. Acesso em 09 nov. 2021.

OLIVEIRA, Ellefson Emmanuel Souza de et al. Eficiência energética e exérgica do processo de produção do biodiesel de babaçu. **Repositório UFC**. Artigos de Eventos. Fortaleza, Ceará, 2016. Disponível em <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54051>. Acesso em 10 nov. 2021.

OLIVEIRA JÚNIOR, João Batista de et al. Segunda lei da termodinâmica: uma revisão bibliográfica. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 7, n. 1, p. 97-106, 2021. Disponível em <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/10566/4721>. Acesso em 11 nov. 2021.

PASSOLONGO, Rodnei. Avaliação termodinâmica, termoeconômica e econômica da integração de sistemas de gaseificação da biomassa em uma usina sucroalcooleira. 2011. **Dissertação de mestrado**. Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.. Data da publicação: 24 fev. 2011. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/88865>. Acesso em 25 nov. 2021.

QUONIAN, Luc; DE SOUZA-LIMA, et al. Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Relações Internacionais no Mundo Atual**, v. 1, n. 22, p. 142-160, 2020. Disponível em <http://revista.unicuritiba.edu.br/index.php/RIMA/article/view/4001/371372323>. Acesso em 04 nov. 2021.

RIBEIRO, Nívea dos Santos Bezerra. Energia solar fotovoltaica: organização atual do mercado mundial. **Artigo**. Pós-Graduação em Relações Internacionais pela Universidade de Brasília. Publicado em 07 jul 2020. Brasília, 2018. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/24343>. Acesso em 19 out. 2021.

RUFATO, David Cesar et al. Lubrificação em turbinas a vapor. **Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho-SITEFA**, v. 3, n. 1, p. 192-203, 2020. Disponível em <https://sitefa.fatecsertaozinho.edu.br/index.php/sitefa/article/view/127/93>. Acesso em 13 nov. 2021.

SANTOS, Samuel Brito Ferreira; SILVA, Luana Nascimento; PEREIRA, Tamires dos Santos. **Análise termodinâmica do sistema compressor-caldeira-turbina a vapor para geração de potência em usina termoeletrica**. 2019. Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências-CONAPESC. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2019. Disponível em https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2019/TRABALHO_EV126_MD1_SA6_ID1960_01072019221648.pdf. Acesso em 25 nov. 2021.

SEMITELA, Leandro Cesar Silva. Viabilidade do uso do bagaço de cana para geração de energia. 2018. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**. JCEC, Vol. 04 N. 01. Disponível em <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/2502/1053>. Acesso em 10 nov. 2021.

SILVA, Boniek Venceslau da Cruz. História da ciência na sala de aula: uma proposta para o ensino de conceitos de (e sobre) termodinâmica. **Epistemologia e Práxis Educativa-EPEduc**, v. 4, n. 1, 2021. Disponível em https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/14018/Disserta%c3%a7%c3%a3o_Rodrig o_PROFIS_So.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 11 nov. 2021.

SILVA, Francisco André Batista. Modelagem Computacional e otimização de um Ciclo Rankine utilizado em uma planta de congeração de energia em uma industria de cimento. 2021. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, 2021. Disponível em <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/57834>. Acesso em 11 nov. 2021.

SILVA, Marcelo Bacci da; MORAIS, Anderson dos Santos. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação**. XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008.

SILVA, Ricardo A da. Ferreira; MORAIS, Willy Ank de. Estudo da Falha em Palheta de uma Turbina a Vapor Geradora de Energia. 2017. **Unisanta Science and Technology**, 2017, 6, Jul. Published Online 2017 Vol. 6 N° 1. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Willy-Morais/publication/318340661_Study_of_the_Failure_of_a_Turbine_Blade_from_a_Steam-Generating_Power_Turbine/links/596536cb4585157fcc5e3a2a/Study-of-the-Failure-of-a-Turbine-Blade-from-a-Steam-Generating-Power-Turbine.pdf. Acesso em 13 nov. 2021.

SIQUEIRA, A. C.; VILAÇA, F. A.; VAL, M. L. DO; FRENEDOZO, R. DE C. Concepção dos estudantes de engenharia mecânica sobre sustentabilidade e educação ambiental. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 7, n. 5, p. 53-62, 22 dez. 2016. Disponível em: <https://revistapos.cruzeirodosul.edu.br/index.php/rencima/article/view/1232/860>. Acesso em 19 out. 2021.

TAKIYA, Carlos et al. Abordagens termodinâmicas: uma análise das leis e dos principais conceitos em livros didáticos. **Revista Binacional Brasil-Argentina: Diálogo entre as ciências**, v. 9, n. 02, p. 292-316, 2020. Disponível em <https://periodicos2.uesb.br/index.php/rbba/article/view/7800/5334>. Acesso em 11 nov. 2021.

TAVARES, Milena da Silva. Análise energética de um sistema de cogeração aplicado à um laticínio de médio porte. 2019. **Monografia**. Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto (MG). Disponível em <https://200.239.128.125/handle/35400000/2144>. Acesso em 25 nov. 2021.

THORSTENSEN, Vera Helena; MOTA, Catherine Rebouças. Meio ambiente, crescimento verde e sustentabilidade. Working Paper 531 – CCGI, nº 26 mai. 2020. **Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas FGV EESP**, São Paulo, 2020. Disponível em https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:7q_rIpMy-lgJ:scholar.google.com/+meio+ambiente+e+sustentabilidade&hl=pt-BR&as_sdt=0,5&as_ylo=2020. Acesso em 04 nov. 2021.

FIGURAS

Figura 1- Potencial de exportação de eletricidade gerada por bagaço-de-cana

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Oferta de Biocombustíveis. Publicação em out. 2021. Brasília, Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis; 2021. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-e-epe-divulgam-estudo-sobre-oferta-de-biocombustivei/PDE2031OfertadeBiocombustiveis.pdf>. Acesso em 10 nov. 2021.

Figura 2- Processos envolvidos na produção da energia elétrica proveniente do bagaço-de cana

EOS Organização e Sistemas Ltda. Disponível em <https://www.eosconsultores.com.br/cogeracao-no-saneamento-basico/>. Acesso em 10 nov. 2021.

Figura 3

SILVA, Boniek Venceslau da Cruz. História da ciência na sala de aula: uma proposta para o ensino de conceitos de (e sobre) termodinâmica. **Epistemologia e Práxis Educativa-EPEduc**, v. 4, n. 1, 2021. Disponível em https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/14018/Disserta%c3%a7%c3%a3o_Rodrig o_PROFIS_So.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 11 nov. 2021.

Figuras 4 e 5

TURBIVAP. Turbina a vapor de condensação. Publicação em 23 set. 2020. Disponível em <https://turbivap.com.br/turbina-a-vapor-de-condensacao/>. Acesso em 24 nov. 2021.

TABELAS

BERTOZZO, F. ; FERREIRA, M. Z. ; GAMBA, V. S. ; PUPO, H. F. ; LEO, A. L. ; SOUZA, S. F. . Aproveitamento do palhicho de cana-de-açúcar para geração de energia renovável. In: **II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, 2011, Foz do Iguaçu. II International Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management, 2011. Disponível em <http://www.sbera.org.br/2sigera/obras/t151.pdf>. Acesso em 10 nov. 2021.

ANEXOS

Apêndice A – Interpolação Valores de Projeto das Turbinas TG1, TG2 e TG3

Valores de Projeto				
TG1 - Admissão				
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)			
		450	490	500
	6000	3301,76	3398,048	3422,12
	6500	3294,318	3391,79	3416,158
	8000	3271,99	3373,014	3398,27
TG2 - Admissão				
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)			
		450	480	500
	6000	3301,76	3373,976	3422,12
	6500	3294,318	3367,422	3416,158
	8000	3271,99	3347,758	3398,27
TG3 - Admissão				
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)			
		450	480	500
	6000	3301,76	3373,976	3422,12
	6500	3294,318	3367,422	3416,158
	8000	3271,99	3347,758	3398,27
TG1 - Extração				
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)			
		100	135	150
	200	2706,63	2697,467	2693,54
	250	2716,89	2753,227	2768,8
	250	2716,89	2753,227	2768,8
TG3 - Extração				
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)			
		150	175	200
	100	2675,46	2775,365	2875,27
	130	2686,308	2779,346	2872,384
	150	2693,54	2782	2870,46

Apêndice B - Cálculo do título de vapor e da entalpia isentrópica na condensação

$$S = S_L + xv * (S_v - S_L)$$

$$S = 7,94896$$

$$S_L = 1,09105$$

$$S_v = 8,41318$$

$$xv = 93,66\%$$

$$H_s = H_L + xv * (H_v - H_L)$$

$$H_s = 2499,716$$

$$H_L = 340,46$$

$$H_v = 2645,88$$

$$xv = 0,9366$$

Método de Interpolação Linear

Interpolação linear da entropia do vapor admitido na condensação e do vapor saturado		
Temp. (°C)	S	SV
30	8,0164	8,4533
32	7,94896	8,41318
35	7,8478	8,353

Interpolação linear do vapor saturado		
Pressão (kPa)	HL	HS
50	340,47	2645,87
50,01	340,49	2645,88
75	384,36	2662,96

Interpolação linear da entropia do líquido na pressão de condensação	
Pressão (kPa)	SL
50	1,091
50,01	1,09105
75	1,2129

Apêndice C - Interpolação na Admissão e Saída das Turbinas TG1, TG2 e TG3

09/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3371,136
6612,036	3292,65	3363,06
8000	3271,99	3344,768
500	450	478,8162
3422,12	3422,12	3422,12
3414,893	3394,325	3414,893
3398,27	3398,27	3398,27

09/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3371,926
6606,065	3292,739	3364,325
8000	3271,99	3345,995
500	450	479,3028
3422,12	3422,12	3422,12
3414,893	3394,325	3414,893
3398,27	3398,27	3398,27

09/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3371,926
6425,09	3295,489	3372,596
8000	3271,99	3351,533
500	450	481,6988
3422,12	3422,12	3422,12
3417,051	3417,051	3417,051
3398,27	3398,27	3398,27

09/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3371,926
6250,18	3299,247	3364,488
8000	3271,99	3345,607
500	450	479,1482
3422,12	3422,12	3422,12
3415,38	3415,38	3415,38
3398,27	3398,27	3398,27

09/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3371,926
6060,797	3293,419	3364,06
8000	3271,99	3345,104
500	450	479,949
3422,12	3422,12	3422,12
3415,432	3415,432	3415,432
3398,27	3398,27	3398,27

09/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3371,926
6000	3301,76	3371,926
6573,261	3293,227	3363,805
8000	3271,99	3345,976
500	450	478,5204
3422,12	3422,12	3422,12
3415,284	3415,284	3415,284
3398,27	3398,27	3398,27

Interpolação na Admissão Turbina TG1

Interpolação na Extração Turbina TG1

Interpolação na Admissão Turbina TG2

Interpolação na Extração Turbina TG2

Interpolação na Admissão Turbina TG3

Interpolação na Extração Turbina TG3

08/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,645
6607,999	3292,716	3364,66
8000	3271,99	3346,361
500	450	479,447
3422,12	3422,12	3422,12
3414,874	3414,874	3414,874
3398,27	3398,27	3398,27

08/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,645
6406,453	3295,71	3370,306
8000	3271,99	3350,104
500	450	480,9288
3422,12	3422,12	3422,12
3417,273	3417,273	3417,273
3398,27	3398,27	3398,27

08/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,34
6572,659	3293,236	3364,808
8000	3271,99	3346,041
500	450	479,3202
3422,12	3422,12	3422,12
3415,291	3415,291	3415,291
3398,27	3398,27	3398,27

08/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,34
6000	3301,76	3372,34
6572,659	3293,236	3364,808
8000	3271,99	3346,041
500	450	479,3202
3422,12	3422,12	3422,12
3415,291	3415,291	3415,291
3398,27	3398,27	3398,27

08/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,34
6000	3301,76	3372,34
6572,659	3293,236	3364,808
8000	3271,99	3346,041
500	450	479,3202
3422,12	3422,12	3422,12
3415,291	3415,291	3415,291
3398,27	3398,27	3398,27

08/05/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,34
6000	3301,76	3372,34
6572,659	3293,236	3364,808
8000	3271,99	3346,041
500	450	479,3202
3422,12	3422,12	3422,12
3415,291	3415,291	3415,291
3398,27	3398,27	3398,27

09/04/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3381,657
6388,796	3295,973	3376,139
8000	3271,99	3355,503
500	450	482,9874
3422,12	3422,12	3422,12
3417,494	3417,494	3417,494
3398,27	3398,27	3398,27

09/04/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3381,657
6000	3301,76	3381,657
6388,796	3295,973	3376,139
8000	3271,99	3355,503
500	450	482,9874
3422,12	3422,12	3422,12
3417,494	3417,494	3417,494
3398,27	3398,27	3398,27

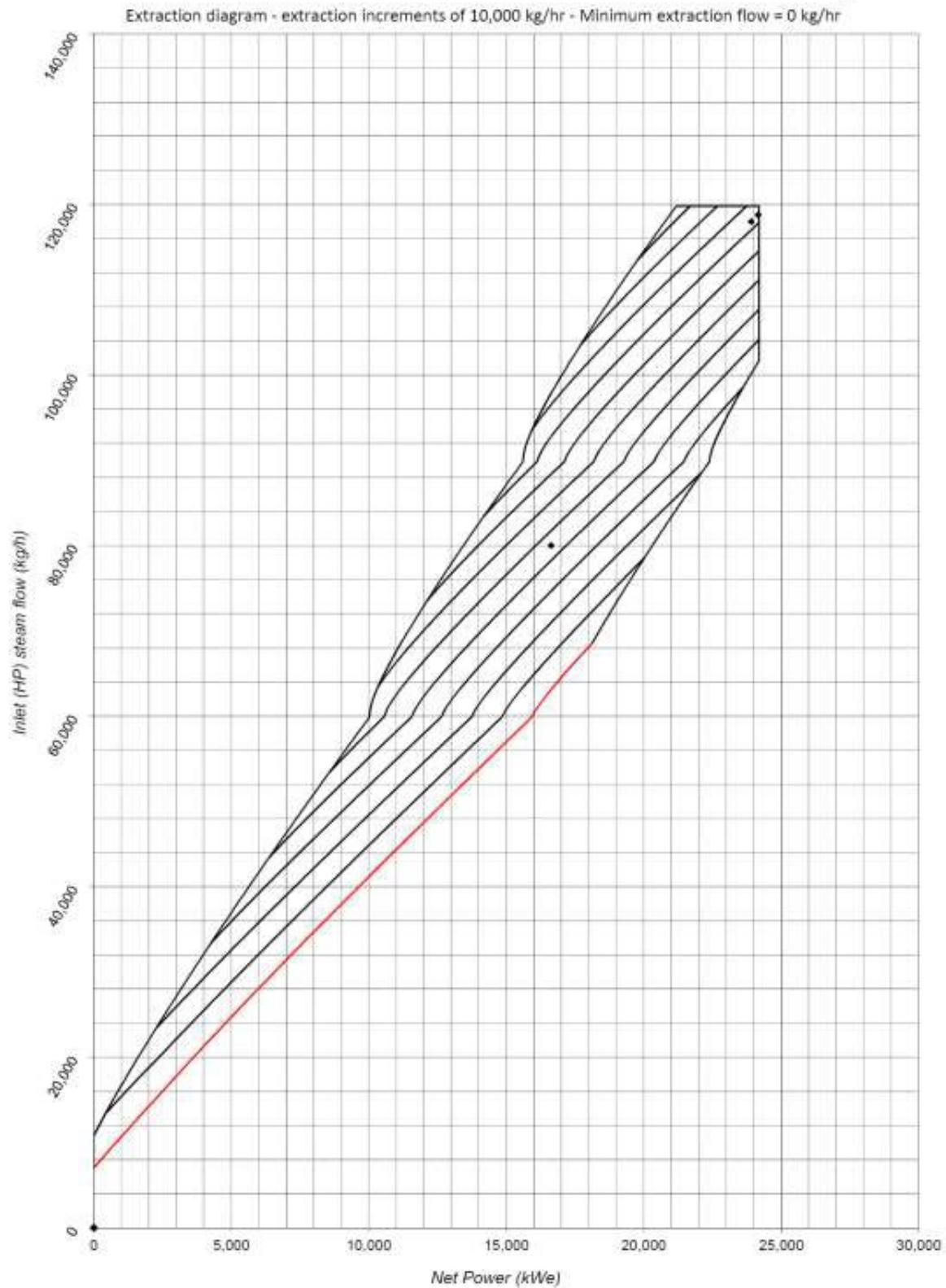
09/04/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,791
6388,491	3293,03	3365,085
8000	3271,99	3346,514
500	450	479,5076
3422,12	3422,12	3422,12
3415,186	3415,186	3415,186
3398,27	3398,27	3398,27

09/04/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,791
6000	3301,76	3372,791
6388,491	3293,03	3365,085
8000	3271,99	3346,514
500	450	479,5076
3422,12	3422,12	3422,12
3415,186	3415,186	3415,186
3398,27	3398,27	3398,27

09/04/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,791
6000	3301,76	3372,791
6388,491	3293,03	3365,085
8000	3271,99	3346,514
500	450	479,5076
3422,12	3422,12	3422,12
3415,186	3415,186	3415,186
3398,27	3398,27	3398,27

09/04/2021		
Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	
6000	3301,76	3372,791
6000	3301,76	3372,791
6388,491	3293,03	3365,085
8000	3271,99	3346,514
500	450	479,5076
3422,12	3422,12	3422,12
3415,186	3415,186	3415,186
3398,27	3398,27	3398,27

Anexo A - Curva de Desempenho da Turbina TG3



Inlet pressure = 65.00 bar abs.

Inlet temperature = 480.00° C.

Extraction pressure = 2.50 bar abs.

Nominal exhaust pressure = 0.130 bar abs.

Anexo B – Tabelas Termodinâmicas

TABLE B.1.1 (continued)
Saturated Water

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
0.01	0.6113	0.00	2501.35	2501.35	0	9.1562	9.1562
5	0.8721	20.98	2489.57	2510.54	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	41.99	2477.75	2519.74	0.1510	8.7498	8.9007
15	1.705	62.98	2465.93	2528.91	0.2245	8.5569	8.7813
20	2.339	83.94	2454.12	2538.06	0.2966	8.3706	8.6671
25	3.169	104.87	2442.30	2547.17	0.3673	8.1905	8.5579
30	4.246	125.77	2430.48	2556.25	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	146.66	2418.62	2565.28	0.5052	7.8478	8.3530
40	7.384	167.54	2406.72	2574.26	0.5724	7.6845	8.2569
45	9.593	188.42	2394.77	2583.19	0.6386	7.5261	8.1647
50	12.350	209.31	2382.75	2592.06	0.7037	7.3725	8.0762
55	15.758	230.20	2370.66	2600.86	0.7679	7.2234	7.9912
60	19.941	251.11	2358.48	2609.59	0.8311	7.0784	7.9095
65	25.03	272.03	2346.21	2618.24	0.8934	6.9375	7.8309
70	31.19	292.96	2333.85	2626.80	0.9548	6.8004	7.7552
75	38.58	313.91	2321.37	2635.28	1.0154	6.6670	7.6824
80	47.39	334.88	2308.77	2643.66	1.0752	6.5369	7.6121
85	57.83	355.88	2296.05	2651.93	1.1342	6.4102	7.5444
90	70.14	376.90	2283.19	2660.09	1.1924	6.2866	7.4790
95	84.55	397.94	2270.19	2668.13	1.2500	6.1659	7.4158
100	101.3	419.02	2257.03	2676.05	1.3068	6.0480	7.3548
105	120.8	440.13	2243.70	2683.83	1.3629	5.9328	7.2958
110	143.3	461.27	2230.20	2691.47	1.4184	5.8202	7.2386
115	169.1	482.46	2216.50	2698.96	1.4733	5.7100	7.1832
120	198.5	503.69	2202.61	2706.30	1.5275	5.6020	7.1295
125	232.1	524.96	2188.50	2713.46	1.5812	5.4962	7.0774
130	270.1	546.29	2174.16	2720.46	1.6343	5.3925	7.0269
135	313.0	567.67	2159.59	2727.26	1.6869	5.2907	6.9777
140	361.3	589.11	2144.75	2733.87	1.7390	5.1908	6.9298
145	415.4	610.61	2129.65	2740.26	1.7906	5.0926	6.8832
150	475.9	632.18	2114.26	2746.44	1.8417	4.9960	6.8378
155	543.1	653.82	2098.56	2752.39	1.8924	4.9010	6.7934
160	617.8	675.53	2082.55	2758.09	1.9426	4.8075	6.7501
165	700.5	697.32	2066.20	2763.53	1.9924	4.7153	6.7078
170	791.7	719.20	2049.50	2768.70	2.0418	4.6244	6.6663
175	892.0	741.16	2032.42	2773.58	2.0909	4.5347	6.6256
180	1002.2	763.21	2014.96	2778.16	2.1395	4.4461	6.5857
185	1122.7	785.36	1997.07	2782.43	2.1878	4.3586	6.5464
190	1254.4	807.61	1978.76	2786.37	2.2358	4.2720	6.5078

TABLE B.1.1 (continued)
Saturated Water

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
195	1397.8	829.96	1959.99	2789.96	2.2835	4.1863	6.4697
200	1553.8	852.43	1940.75	2793.18	2.3308	4.1014	6.4322
205	1723.0	875.03	1921.00	2796.03	2.3779	4.0172	6.3951
210	1906.3	897.75	1900.73	2798.48	2.4247	3.9337	6.3584
215	2104.2	920.61	1879.91	2800.51	2.4713	3.8507	6.3221
220	2317.8	943.61	1858.51	2802.12	2.5177	3.7683	6.2860
225	2547.7	966.77	1836.50	2803.27	2.5639	3.6863	6.2502
230	2794.9	990.10	1813.85	2803.95	2.6099	3.6047	6.2146
235	3060.1	1013.61	1790.53	2804.13	2.6557	3.5233	6.1791
240	3344.2	1037.31	1766.50	2803.81	2.7015	3.4422	6.1436
245	3648.2	1061.21	1741.73	2802.95	2.7471	3.3612	6.1083
250	3973.0	1085.34	1716.18	2801.52	2.7927	3.2802	6.0729
255	4319.5	1109.72	1689.80	2799.51	2.8382	3.1992	6.0374
260	4688.6	1134.35	1662.54	2796.89	2.8837	3.1181	6.0018
265	5081.3	1159.27	1634.34	2793.61	2.9293	3.0368	5.9661
270	5498.7	1184.49	1605.16	2789.65	2.9750	2.9551	5.9301
275	5941.8	1210.05	1574.92	2784.97	3.0208	2.8730	5.8937
280	6411.7	1235.97	1543.55	2779.53	3.0667	2.7903	5.8570
285	6909.4	1262.29	1510.97	2773.27	3.1129	2.7069	5.8198
290	7436.0	1289.04	1477.08	2766.13	3.1593	2.6227	5.7821
295	7992.8	1316.27	1441.78	2758.05	3.2061	2.5375	5.7436
300	8581.0	1344.01	1404.93	2748.94	3.2533	2.4511	5.7044
305	9201.8	1372.33	1366.38	2738.72	3.3009	2.3633	5.6642
310	9856.6	1401.29	1325.97	2727.27	3.3492	2.2737	5.6229
315	10547	1430.97	1283.48	2714.44	3.3981	2.1821	5.5803
320	11274	1461.45	1238.64	2700.08	3.4479	2.0882	5.5361
325	12040	1492.84	1191.13	2683.97	3.4987	1.9913	5.4900
330	12845	1525.29	1140.56	2665.85	3.5506	1.8909	5.4416
335	13694	1558.98	1086.37	2645.35	3.6040	1.7863	5.3903
340	14586	1594.15	1027.86	2622.01	3.6593	1.6763	5.3356
345	15525	1631.17	964.02	2595.19	3.7169	1.5594	5.2763
350	16514	1670.54	893.38	2563.92	3.7776	1.4336	5.2111
355	17554	1713.13	813.59	2526.72	3.8427	1.2951	5.1378
360	18651	1760.48	720.52	2481.00	3.9146	1.1379	5.0525
365	19807	1815.96	605.44	2421.40	3.9983	0.9487	4.9470
370	21028	1890.37	441.75	2332.12	4.1104	0.6868	4.7972
374.1	22089	2099.26	0	2099.26	4.4297	0	4.4297

TABLE B.1.2 (continued)
Saturated Water Pressure Entry

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
0.6113	0.01	0.00	2501.3	2501.3	0	9.1562	9.1562
1.0	6.98	29.29	2484.89	2514.18	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	54.70	2470.59	2525.30	0.1956	8.6322	8.8278
2.0	17.50	73.47	2460.02	2533.49	0.2607	8.4629	8.7236
2.5	21.08	88.47	2451.56	2540.03	0.3120	8.3311	8.6431
3.0	24.08	101.03	2444.47	2545.50	0.3545	8.2231	8.5775
4.0	28.96	121.44	2432.93	2554.37	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	137.79	2423.66	2561.45	0.4763	7.9187	8.3950
7.5	40.29	168.77	2406.02	2574.79	0.5763	7.6751	8.2514
10	45.81	191.81	2392.82	2584.63	0.6492	7.5010	8.1501
15	53.97	225.91	2373.14	2599.06	0.7548	7.2536	8.0084
20	60.06	251.38	2358.33	2609.70	0.8319	7.0766	7.9085
25	64.97	271.90	2346.29	2618.19	0.8930	6.9383	7.8313
30	69.10	289.21	2336.07	2625.28	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	317.55	2319.19	2636.74	1.0258	6.6441	7.6700
50	81.33	340.47	2305.40	2645.87	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.77	384.36	2278.59	2662.96	1.2129	6.2434	7.4563
100	99.62	417.44	2258.02	2675.46	1.3025	6.0568	7.3593
125	105.99	444.30	2241.05	2685.35	1.3739	5.9104	7.2843
150	111.37	467.08	2226.46	2693.54	1.4335	5.7897	7.2232
175	116.06	486.97	2213.57	2700.53	1.4848	5.6868	7.1717
200	120.23	504.68	2201.96	2706.63	1.5300	5.5970	7.1271
225	124.00	520.69	2191.35	2712.04	1.5705	5.5173	7.0878
250	127.43	535.34	2181.55	2716.89	1.6072	5.4455	7.0526
275	130.60	548.87	2172.42	2721.29	1.6407	5.3801	7.0208
300	133.55	561.45	2163.85	2725.30	1.6717	5.3201	6.9918
325	136.30	573.23	2155.76	2728.99	1.7005	5.2646	6.9651
350	138.88	584.31	2148.10	2732.40	1.7274	5.2130	6.9404
375	141.32	594.79	2140.79	2735.58	1.7527	5.1647	6.9174
400	143.63	604.73	2133.81	2738.53	1.7766	5.1193	6.8958
450	147.93	623.24	2120.67	2743.91	1.8206	5.0359	6.8565
500	151.86	640.21	2108.47	2748.67	1.8606	4.9606	6.8212
550	155.48	655.91	2097.04	2752.94	1.8972	4.8920	6.7892
600	158.85	670.54	2086.26	2756.80	1.9311	4.8289	6.7600
650	162.01	684.26	2076.04	2760.30	1.9627	4.7704	6.7330
700	164.97	697.20	2066.30	2763.50	1.9922	4.7158	6.7080
750	167.77	709.45	2056.98	2766.43	2.0199	4.6647	6.6846
800	170.43	721.10	2048.04	2769.13	2.0461	4.6166	6.6627

788 ■ APPENDIX B SI UNITS: THERMODYNAMIC TABLES

TABLE B.1.3 (continued)
Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
	5000 kPa (263.99°C)				6000 kPa (275.64°C)			
Sat.	0.03944	2597.12	2794.33	5.9733	0.03244	2589.69	2784.33	5.8891
300	0.04532	2697.94	2924.53	6.2083	0.03616	2667.22	2884.19	6.0673
350	0.05194	2808.67	3068.39	6.4492	0.04223	2789.61	3042.97	6.3334
400	0.05781	2906.58	3195.64	6.6458	0.04739	2892.81	3177.17	6.5407
450	0.06330	2999.64	3316.15	6.8185	0.05214	2988.90	3301.76	6.7192
500	0.06857	3090.92	3433.76	6.9758	0.05665	3082.20	3422.12	6.8802
550	0.07368	3181.82	3550.23	7.1217	0.06101	3174.57	3540.62	7.0287
600	0.07869	3273.01	3666.47	7.2588	0.06525	3266.89	3658.40	7.1676
700	0.08849	3457.67	3900.13	7.5122	0.07352	3453.15	3894.28	7.4234
800	0.09811	3646.62	4137.17	7.7440	0.08160	3643.12	4132.74	7.6566
900	0.10762	3840.71	4378.82	7.9593	0.08958	3837.84	4375.29	7.8727
1000	0.11707	4040.35	4625.69	8.1612	0.09749	4037.83	4622.74	8.0751
1100	0.12648	4245.61	4878.02	8.3519	0.10536	4243.26	4875.42	8.2661
1200	0.13587	4456.30	5135.67	8.5330	0.11321	4454.00	5133.28	8.4473
1300	0.14526	4671.96	5398.24	8.7055	0.12106	4669.64	5395.97	8.6199
	8000 kPa (295.06°C)				10000 kPa (311.06°C)			
Sat.	0.02352	2569.79	2757.94	5.7431	0.01803	2544.41	2724.67	5.6140
300	0.02426	2590.93	2784.98	5.7905	—	—	—	—
350	0.02995	2747.67	2987.30	6.1300	0.02242	2699.16	2923.39	5.9442
400	0.03432	2863.75	3138.28	6.3633	0.02641	2832.38	3096.46	6.2119
450	0.03817	2966.66	3271.99	6.5550	0.02975	2943.32	3240.83	6.4189
500	0.04175	3064.30	3398.27	6.7239	0.03279	3045.77	3373.63	6.5965
550	0.04516	3159.76	3521.01	6.8778	0.03564	3144.54	3500.92	6.7561
600	0.04845	3254.43	3642.03	7.0205	0.03837	3241.68	3625.34	6.9028
700	0.05481	3444.00	3882.47	7.2812	0.04358	3434.72	3870.52	7.1687
800	0.06097	3636.08	4123.84	7.5173	0.04859	3628.97	4114.91	7.4077
900	0.06702	3832.08	4368.26	7.7350	0.05349	3826.32	4361.24	7.6272
1000	0.07301	4032.81	4616.87	7.9384	0.05832	4027.81	4611.04	7.8315
1100	0.07896	4238.60	4870.25	8.1299	0.06312	4233.97	4865.14	8.0236
1200	0.08489	4449.45	5128.54	8.3115	0.06789	4444.93	5123.84	8.2054
1300	0.09080	4665.02	5391.46	8.4842	0.07265	4660.44	5386.99	8.3783