

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

### IMPROVEMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF A THERMOELECTRIC POWER PLANT WITH THE IMPLEMENTATION OF A NEW TURBOGENERATOR

HENRIQUE BARBOSA RODRIGUES, Ariani Martins Caponi Lima, Rogério Rodrigues dos Santos

<sup>1</sup>Academica de Engenharia /FACEG Email: rogerio-rsantoshotmail.com

<sup>2</sup>Academica de Engenharia /FACEG <sup>3</sup>Orientador(a) e Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG Email: rogerio-rsantoshotmail.com

**Resumo:** O presente trabalho trata-se da verificação do melhoramento da eficiência energética de uma usina termoeletrica, 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 termoeletrica 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 da eficiência energética, com a implantação de uma nova turbina na termoeletrica. 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.

**Keywords:** Energy Efficiency. Steam Turbine. Sustainability. Mechanical Engineering.

## 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 termoeletricas, 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, uma empresa 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 termoeletrica, 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/cm<sup>2</sup> 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 termoeletrica, 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 para 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 termoeletrica, 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 com a implementação da terceira turbina.

### FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

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 melhora da eficiência energética, com a implantação de uma nova turbina na termoeletrica 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 termoeétrica, bem como também influenciam condições de extração e condensação. Logo, como hipótese ao problema proposto, espera-se que a termoeétrica, objeto de análise deste estudo, mesmo com a instalação da nova turbina, não tenha alcançado melhora na eficiência energética, considerando que as três turbinas não funcionam simultaneamente.

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.

## 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.

Cada equipamento possui uma vazão diferente. 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 cinética 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 termoeétrica. 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 termoeétrica conseguiria manter, anualmente,

o fornecimento de energia elétrica de aproximadamente 77.000 residências na região do Centro-Oeste.

## 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 termoeletrica 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.

Tabela 1 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 1

Dados Reais TG1				
Data	Pressão Admissão TG1	Temperatura Admissão TG1	Pressão Extração TG1	Temperatura Extração TG1
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 1 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 2

Dados Reais TG2				
Data	Pressão Admissão TG2	Temperatura Admissão TG2	Pressão Condensação TG2	Temperatura Condensação TG2
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 1 - Dados coletados pelos instrumentos do turbogerador 3

Dados Reais TG3				
Data	Pressão Admissão TG1	Temperatura Admissão TG1	Pressão Extração TG1	Temperatura Extração TG1
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 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, 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 1 - Dado de projeto do Turbogenerador 1

### 1.2 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA TURBINA

Pontos	Máquina acionada						
	Gerador						
	Crítica		Normal		Máxima		
Potência nos bornes do gerador	9,7	4,8	19,8	10,4	20,0	10,5	MW
Pressão do vapor de entrada	83	83	85	85	86	85	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 do 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 1 - Dado de projeto do Turbogenerador 2

## 1.2 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DA TURBINA

Pontos	Máquina acionada		Gerador				Unidades
	Crítica	Normal	Normal	Máxima	Máxima	Máxima	
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 do vapor de saída	38.000	20.000	75.000	40.000	75.000	40.000	kg/h
Consumo específico	3,62	4,17	3,76	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 1 - 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

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.

## 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 turbogenerador 3 será calculado através do modo de extração.

Para a realização dos cálculos necessários para a verificação da possibilidade de melhora da eficiência energética, da termoelétrica em exame, a partir da nova turbina, houve a necessidade de utilizar as tabelas termodinâmicas conforme o Apêndice 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, 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.

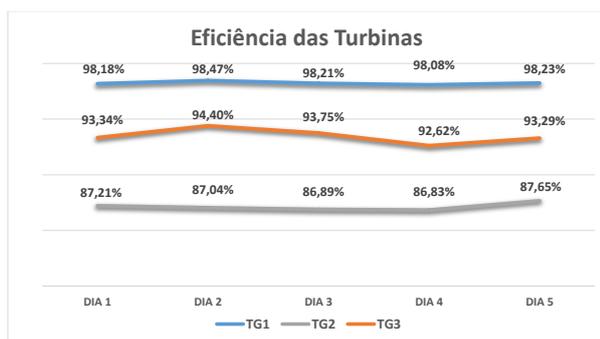
Tabela 1 - Valores diários e média da eficiência das turbinas

Data Calculada	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	Média
Turbinas	05/05/2021	06/05/2021	07/05/2021	08/05/2021	09/05/2021	
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	
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), 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 1 - 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 1 - Razão de dados anuais de produção de vapor e geração de energia elétrica por turbina.

Data	Pr.Eletric TG1	Pr.Eletric TG2	Pr.Eletric TG3	Pr.Vap_ TG1	Pr.Vap_ TG2	Pr.Vap_ TG3	Pr.Vap_TG1/ Pr.EletricTG1	Pr.Vap_TG2/ Pr.EletricTG2	Pr.Vap_TG3/ Pr.EletricTG3
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 evidenciam os valores de energia elétrica produzida pelos TG1, TG2 e TG3 em MW, respectivamente. Já os dados das colunas azuis evidenciam os valores de vapor admitidos na entrada de cada uma das turbinas, em toneladas e por fim os dados das colunas em verde 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.

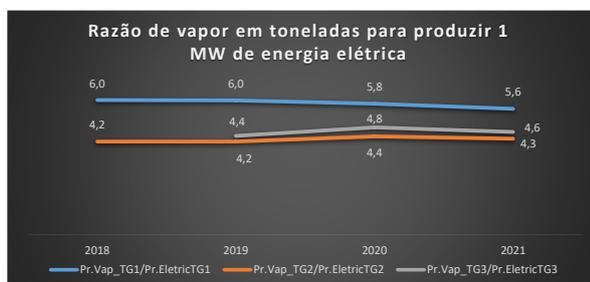
Com isso, verifica-se que o valor médio das duas primeiras variáveis do TG3 é menor do que os demais

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 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.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS:

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 termoelétrica.

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 melhora na eficiência energética da termoelétrica 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 termoelétrica 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 termoelétrica 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 melhora da eficiência energética, com a implantação de uma nova turbina, na termoelétrica 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.

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.

MACIEL, Carlos Renato França. Análise energética e exergética 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\\_Macieler\\_1.pdf](http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_Macieler_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.

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.

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.cruzeirosul.edu.br/index.php/rencima/article/view/1232/860>. Acesso em 19 out. 2021.