

Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG
Curso de Engenharia Mecânica

JOÃO PEDRO CAMPOS JUSTINO
DANIEL BERTONSIN BRITO ALVES

**ANÁLISE E CONFIGURAÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DE DESEMPENHO DE
TURBINAS PARA ATENDER REQUISITOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA E
FORNECIMENTO DE VAPOR PARA INDÚSTRIA**

Publicação Nº 01

Goianésia - GO
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

ALVES, D.B.B; JUSTINO, J.P.C.

Estudo, análise e configuração para otimização de desempenho de turbinas para atender requisitos de geração de energia e fornecimento de vapor para indústria (ENM/FACEG, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2024).

ARTIGO – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Mecânica.

1. Turbogenerador

2. Renovável

3. OCTAVE

I. ENM/FACEG

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, D. B. B; JUSTINO, J. P. C. Análise e configuração para otimização de desempenho de turbinas para atender requisitos de geração de energia e fornecimento de vapor para indústria. Artigo, Publicação 01 2024/2 Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 2024.

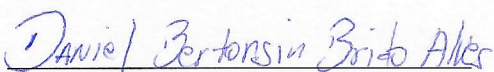
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Bertonsin Brito Alves, João Pedro Campos Justino

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Análise e otimização da configuração de turbinas para atender requisitos de geração de energia e fornecimento de vapor para indústria.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica ANO: 2024

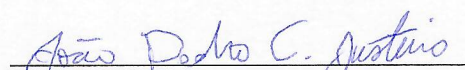
É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Daniel Bertonsin Brito Alves

Endereço Permanente

76.382-244 - Goianésia/GO – Brasil



João Pedro Campos Justino

Endereço Permanente

76380-784 - Goianésia/GO - Brasil

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, EM FORMA DE ARTIGO,
SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACEG**

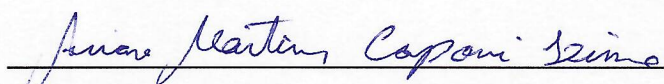
Aprovados por:



**Alessandro Morais Martins, Mestre (FACEG)
(ORIENTADOR)**



**Marinês Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes, Doutora (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**Ariane Caponi, Mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE TURBINAS PARA ATENDER REQUISITOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA E FORNECIMENTO DE VAPOR PARA INDÚSTRIA

Daniel Bertonsin Brito Alves¹, João Pedro Campos Justino², Alessandro Morais Martins³

¹Acadêmica de Engenharia Mecânica/FACEG Email: Daniel Bertonsin Brito Alves / danielbertonsinbrito@hotmail.com

²Acadêmico de Engenharia Mecânica /FACEG Email: João Pedro Campos Justino / joaopedrojc9313@gmail.com

³Orientador(a) e Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG Email: Alessandro Morais Martins / a_mmartins@yahoo.com.br

Resumo: A geração de energia a partir de turbinas em ambientes industriais é uma prática comum, porém, sua eficiência e capacidade de atender às necessidades específicas de cada processo requerem melhoria contínua. A cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar é um aspecto que vem sendo considerado, devido à sua autossuficiência e crescente utilização. A escolha correta da configuração da turbina é importante para a eficiência global do processo, que pode ser uma ação ou uma reação, dependendo do princípio de funcionamento. Este projeto centra-se na análise e otimização da configuração da turbina, com o objetivo de garantir um fornecimento adequado de vapor aos processos industriais e maximizar a produção de energia. Utilizando o software OCTAVE, o código foi desenvolvido para determinar a configuração operacional mais eficiente para três turbogeradores com diferentes tipos de gases de escape. Os resultados obtidos incluem análise detalhada dos dados coletados, desenvolvimento de código eficaz em OCTAVE, identificação de melhores práticas operacionais e verificação da eficácia do código em relação a dados reais. Este projeto contribuiu não só para a otimização dos turbogeradores, mas também para o avanço do conhecimento na área da produção de energia em contexto industrial.

Palavras-chaves: Turbogenerador; Renovável; OCTAVE.

Abstract: Turbine power generation in industrial environments is common practice, but its efficiency and ability to meet the specific needs of each process require continuous improvement. Cogeneration of energy from sugarcane bagasse is one aspect that is being considered, due to its self-sufficiency and growing use. The correct choice of turbine configuration is essential for the overall efficiency of the process, which can be an action or a reaction, depending on the operating principle. This project focuses on the analysis and optimization of the turbine configuration, with the aim of ensuring an adequate supply of steam to industrial processes and maximizing energy production. Using OCTAVE software, the code was developed to determine the most efficient operating configuration for three turbogenerators with different types of exhaust gas. The results obtained include detailed analysis of the data collected, development of efficient code in OCTAVE, identification of best operating practices and verification of the code's effectiveness in relation to real data. This project has contributed not only to the optimization of turbogenerators, but also to the advancement of knowledge in the area of energy production in an industrial context.

Keywords: Turbogenerator; Renewable; OCTAVE.

INTRODUÇÃO

A produção de energia por meio do bagaço da cana-de-açúcar é algo que vem crescendo muito por conta de sua autossustentabilidade, pois toda a matéria da cana é utilizada no processo para produção de açúcar, álcool e cogeração de energia elétrica. A cogeração de energia elétrica é feita através do subproduto da cana-de-açúcar, que é o bagaço. Em condições ideais, são queimadas 6,5 toneladas de bagaço para a produção de 1 MWh de energia. Com essa produção de energia elétrica, as indústrias deixam de comprar energia elétrica e passam a produzir e até mesmo vender, dependendo da capacidade de produção [1].

As turbinas são equipamentos fundamentais em diversas aplicações industriais e compreender os diferentes tipos de emissões de vapor é importante para otimizar o seu funcionamento. Existem quatro tipos principais de exaustão de vapor nas turbinas: exaustão livre, em que o

vapor é descarregado diretamente na atmosfera. O sistema de condensação utiliza um condensador para transformar o vapor em líquido após passar pela turbina; exaustão de contrapressão, na qual, apesar da perda de pressão, o vapor mantém pressão suficiente para uso durante a operação; e o escapamento combinado, que combina o escapamento convencional com um estágio de condensação adicional. No segundo caso, a válvula de controle desempenha um papel importante, controlando a vazão do vapor pressurizado utilizado nos processos. Esta variedade de sistemas de exaustão proporciona flexibilidade e eficiência às turbinas, permitindo-lhes adaptar-se às necessidades específicas de cada aplicação industrial [2].

A utilização de turbinas para geração de energia em contextos industriais é uma prática comum, mas a sua eficiência e capacidade de atender aos requisitos específicos de cada processo são aspectos que requerem melhoria contínua. Neste cenário, a análise e otimização da configuração de turbinas surge como uma área primária de

pesquisa. A configuração adequada deste equipamento não só afeta diretamente a quantidade de energia elétrica produzida, mas também o fornecimento de vapor, recurso crítico em alguns processos industriais [1].

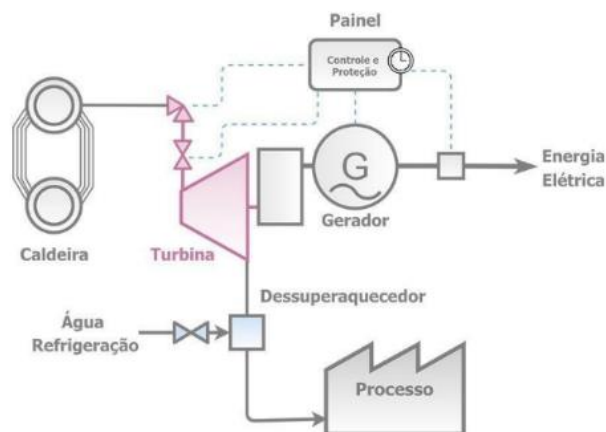
REFERENCIAL TEÓRICO

A turbina e o gerador são as duas partes principais de um turbogerador. O vapor das caldeiras move a turbina, e o gerador transforma esse movimento em energia elétrica. O vapor entra na turbina com alta pressão e temperatura, acelerando as pás. Essa rotação é enviada para o gerador, que gera eletricidade [2].

As turbomáquinas são equipamentos utilizados nas indústrias sucroalcooleiras para a produção de energia elétrica. Seu funcionamento se dá através de um fluxo contínuo de fluidos. No caso do trabalho em questão, refere-se a turbomáquinas movidas a vapor, ou seja, turbogeradores. Elas operam com várias fileiras de palhetas rotativas. A energia é extraída do fluido, o qual está com uma grande quantidade de energia térmica. Ao passar pelas palhetas, o fluido vai perdendo energia e pressão, que é transferida para as turbinas na forma de energia mecânica, que por sua vez é transformada em energia elétrica [3].

Para realizar o trabalho precisaremos entender o comportamento dos turbos geradores, começando pelo turbo gerador 1 (Figura 1), ele é classificado como um turbo gerador de contrapressão, projetado para extrair energia do fluido sem condensá-lo completamente. Como resultado, o vapor é liberado com uma temperatura de aproximadamente 127 °C a uma pressão de 1,5 bar, mantendo-se superaquecido. Este turbo gerador desempenha um papel importante no funcionamento eficiente do sistema, pois é responsável por fornecer uma parte significativa do vapor necessário para a usina [4].

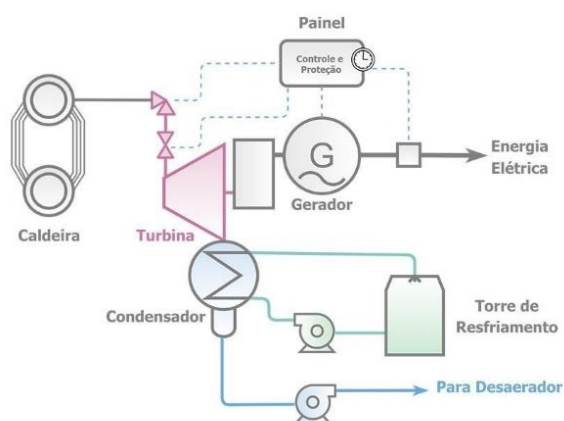
Figura 1 – Turbo gerador de contrapressão



Fonte: Wortice, 2020

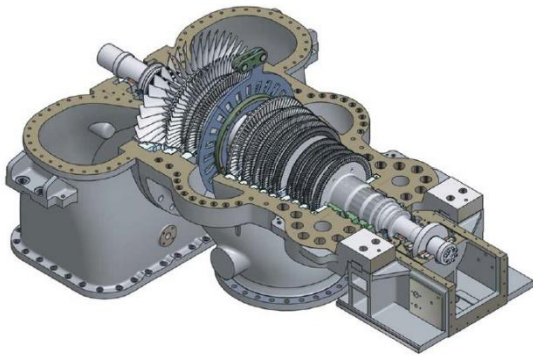
O Turbo Gerador 2 (Figura 2) é uma turbina de condensação, reconhecida por sua eficiência superior na geração de energia. Opera de forma que o vapor é completamente condensado após passar por um condensador, saindo a uma temperatura de 52 °C e uma pressão de 0,14 bar. Utilizando equações termodinâmicas, a cogeração de energia será calculada considerando uma perda de eficiência de 5% devido a transmissões mecânicas em turbinas, redutores e geradores [4].

Figura 2 – Turbo gerador de condensação



Fonte: Wortice, 2020

Figura 3 - Turbo Gerador de função mista



Fonte: NG METALURGICA, 2020.

O Turbo Gerador 3, como descrito na figura 3, possui uma função mista, sendo capaz de extrair vapor a 127 °C e 1,5 bar, além de condensar vapor a 52 °C e 0,14 bar. Este gerador equilibra geração de energia e entrega de vapor. O gráfico de geração de energia para este turbo gerador mostrará a relação entre a abertura da válvula de extração e a produção de vapor de escape, para compreender a eficiência operacional [5].

A diferença entre o turbo gerador 1 e 2 pode ser explicada por diferentes fatores, um deles seria a quantidade de palhetas: quanto mais palhetas houver, mais o vapor perde energia ao passar por elas. Largura e altura: A largura e altura influenciam a condensação. A largura e a altura entre as palhetas fornece uma área, que quanto maior for a área menor a pressão e quanto menor a área maior a pressão [4]. Ex:

$$P = \frac{F}{A}$$

A análise e otimização de configurações de turbinas para atender às demandas de geração de energia e fornecimento de vapor representam uma área importante dentro da engenharia de energia. Diversos autores ressaltam a importância de maximizar a eficiência energética e o desempenho desses sistemas [6]. A escolha da configuração adequada da turbina desempenha um papel importante na eficiência global do processo de geração de energia e fornecimento de vapor, influenciando

diretamente tanto a viabilidade econômica quanto a sustentabilidade ambiental [1].

A otimização de turbinas é um desafio complexo devido à interação de múltiplos parâmetros, como velocidade, temperatura e pressão do vapor, que afetam diretamente o desempenho do sistema [6]. Portanto, se emprega abordagens computacionais avançadas, como o OCTAVE, para explorar eficientemente o vasto espaço de design e encontrar soluções que atendam às necessidades específicas de cada aplicação [7].

O OCTAVE, oferece uma plataforma integrada para modelagem, simulação e otimização de sistemas de turbinas. Ao empregar algoritmos avançados de otimização, como algoritmos genéticos e algoritmos de enxame de partículas, o OCTAVE é capaz de explorar de forma eficaz o espaço de projeto, considerando múltiplos objetivos e restrições. Isso permite aos engenheiros encontrar soluções que equilibrem não apenas a eficiência energética, mas também aspectos econômicos e ambientais [7].

A análise multicritério desempenha um papel na otimização de sistemas de turbinas. Esta abordagem permite a consideração simultânea de múltiplos objetivos, como maximizar a eficiência energética, minimizar os custos operacionais e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Através da análise multicritério, os engenheiros podem identificar soluções que não apenas atendam às necessidades de curto prazo de geração de energia e fornecimento de vapor, mas também estejam alinhadas com os objetivos de longo prazo de sustentabilidade e responsabilidade ambiental [3].

Além dos benefícios técnicos e econômicos da otimização de turbinas, há também implicações significativas em termos de segurança e confiabilidade dos sistemas. Destacam a importância de considerar aspectos de segurança durante o processo de otimização, garantindo que as configurações resultantes sejam robustas e capazes de lidar com uma variedade de condições operacionais e cenários de falha [1].

Alguns estudos exploram o potencial de diversas tecnologias como inteligência artificial e internet das coisas, para melhorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de energia, permitindo a monitorização em tempo real, diagnóstico de falhas e adaptação automática das configurações da turbina para otimizar o desempenho operacional [8].

Considerando o papel importante da manutenção preditiva na otimização de turbinas, destacando que a implementação de sistemas de monitoramento contínuo e análise de dados pode ajudar a prever e prevenir falhas, maximizando assim a disponibilidade e a confiabilidade das turbinas [9].

A otimização de turbinas também desempenha um papel na transição para fontes de energia renovável, explorando como as turbinas podem ser adaptadas e otimizadas para integrar de forma eficiente fontes intermitentes de energia, como energia solar e eólica, na rede elétrica, garantindo assim a estabilidade e confiabilidade do sistema [10].

A análise e otimização de configurações de turbinas utilizando o software OCTAVE apoia-se em uma sólida base teórica, integrando eficiência energética, viabilidade econômica, sustentabilidade ambiental, segurança operacional, integração de tecnologias emergentes, manutenção preditiva, transição para energias renováveis, contexto econômico e regulatório. O uso de abordagens computacionais avançadas e a consideração de múltiplos critérios são essenciais para enfrentar os desafios complexos associados à concepção e operação de sistemas de turbinas em ambientes de geração de energia e fornecimento de vapor [8].

METODOLOGIA

Para realizar este trabalho, foi adotada algumas etapas para o seu desenvolvimento. Primeiramente, foi necessário coletar dados e informações dos turbos geradores de contrapressão, de condensação e função mista. Estes dados incluem a capacidade de operação, a temperatura e a pressão de entrada e saída de cada turbo

gerador. Essas coletas de dados são fundamentais para compreendermos o funcionamento dos mesmos.

Após a coleta dos dados, foi preciso desenvolver as equações correspondentes aos gráficos de cada turbo gerador. Nas Figuras 3, 4 e 5 estão os gráficos utilizados para a realização das equações do projeto.

Figura 3, 4 e 5

Figura 3

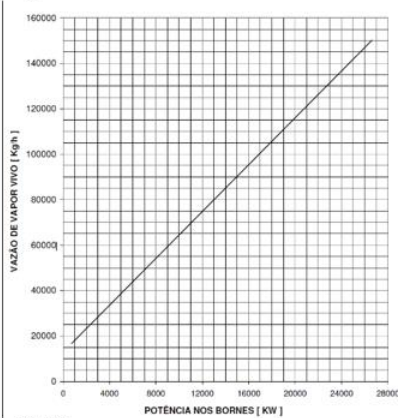


Figura 4

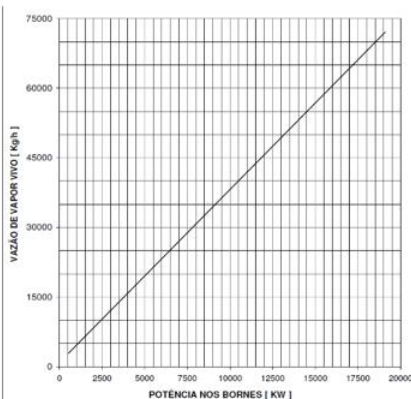
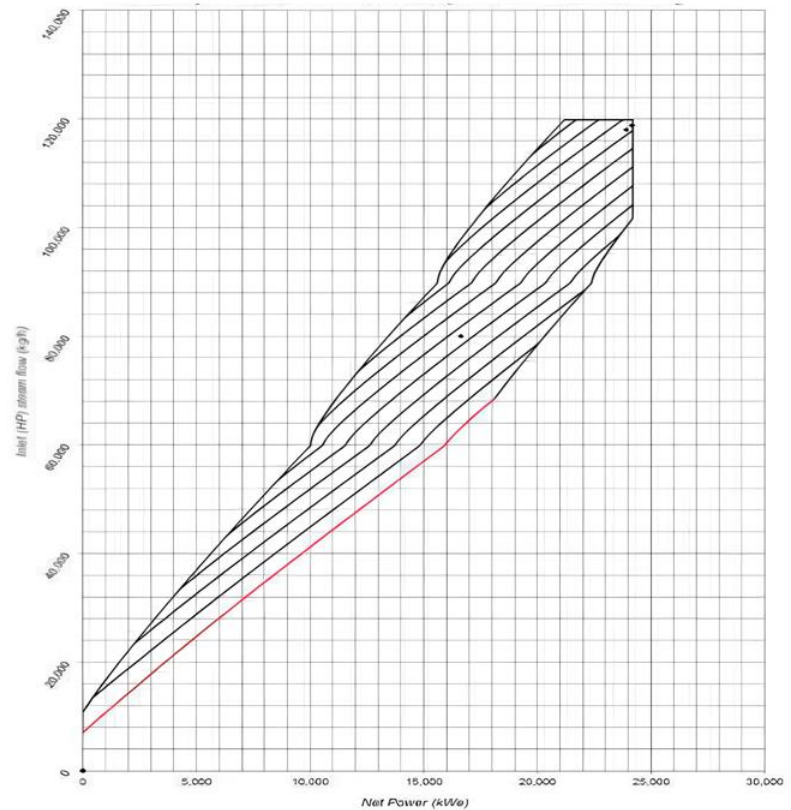


Figura 5



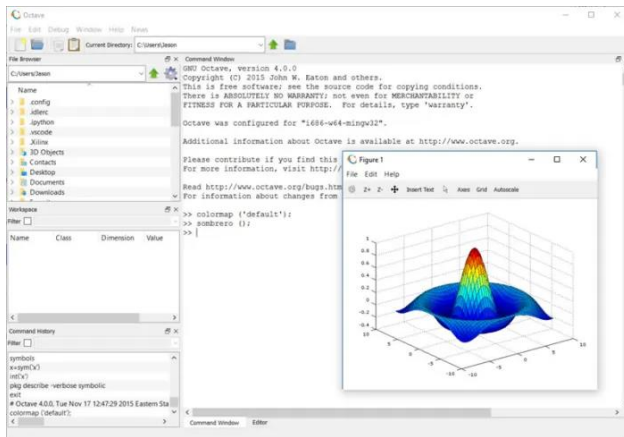
Fonte: NG METALURGICA, 2020.

Com estes gráficos obteve-se a maior parte das informações necessárias para a criação do código, como a entrada de vapor presente no eixo Y do gráfico, onde os dados estão em Kg/h e a quantidade produzida de energia em relação à entrada de vapor presente no eixo X em KW. Conforme a figura 3 referente ao turbo gerador 1, a vazão de vapor admissível é de 20 mil kg/h até 160 mil kg/h, podendo gerar em torno de 1 mil KW até 28 mil KW tornando-se uma função linear. Para o turbo gerador 2, a vazão de vapor admissível é de 5 mil kg/h até 75 mil kg/h, podendo gerar de 5 mil KW até 19 mil KW conforme o gráfico da figura 4. No turbo gerador 3, a vazão de vapor admissível é de 8 mil kg/h até 120 mil kg/h e podendo gerar até 24 mil KW, porém o turbo gerador 3, por conta de uma válvula de escape, o mesmo pode fazer a extração de vapor conforme representada nas linhas diagonais, e cada linha superior ocorre o aumento da extração de mais 10 toneladas de vapor, e para a linha vermelha a válvula de

extração está fechada pois corresponde a 100% de condensação, a medida que a linha se afasta da posição da linha vermelha para cima, a válvula de extração é gradualmente aberta, permitindo a liberação controlada de vapor de escape. Cada linha ascendente no gráfico representa um aumento no fluxo de vapor de escape em intervalos de 10t/h, começando com 10t/h no primeiro ponto acima da linha vermelha e adicionando mais 10t/h a cada linha subsequente, até atingir um máximo de 110t/h de vapor de escape, conforme a figura 5.

O sistema de linguagem OCTAVE como demonstrado na figura 6, é familiar para os estudantes de engenharia, por possuir código aberto e ser de fácil acesso.

Figura 6 - OCTAVE



Fonte: Octave, 2024.

Para a programação, foi utilizado alguns valores como variáveis que foram inseridas no código para calcular o valor final da energia que podemos produzir. As variáveis incluídas foram: o vapor total produzido pelas caldeiras, entrada de vapor em cada turbo gerador, exportação do turbo gerador 3 e condensação 100% do turbo gerador 3. Com esses dados, o software calculou a energia total

Equação do TG1, gerada através da figura 3:

```
if vtg1 <=18
    ptg1=0;
else
    ptg1=-2453.67481413942+(0.19240321745281*(vtg1*1000))+((8.57120113554*10^-09)*(vtg1*1000)^2);
endif
```

Equação do TG2, gerada através da figura 4:

```
if vtg2 <= 5
    ptg2=0;
else
    ptg2=-290.292287827202 +( 0.271251694074207*(vtg2*1000)) - (4.135141768666*10^-08*(vtg2*1000)^2);
endif
```

Equação do turbo gerador 3 gerada através da figura 5:

```
#10 TONELADAS DE EXTRAÇÃO
if etg3>=1 && etg3<=10
    etg3=10;
    if vtg3 <= 60 && vtg3>=12
        ptg3= -3500 + (0.3*(vtg3*1000));
    elseif vtg3 >=61 && vtg3<=90
        ptg3=0.25*(vtg3*1000);
    else
        fprintf('\n\n033[1;31mNão é possível extrair 10Tv com entrada de vapor maior que 90Tv\033[0m\n');
        teste=1;
    endif
```

Fonte: Própria, 2024.

produzida com base na quantidade de vapor, a energia produzida em cada gerador, a quantidade de energia consumida e exportada, e a quantidade de vapor entregue para o processo e a eficiência de cada turbo gerador. Em sequência, comparamos os resultados com situações reais para determinar a melhor configuração operacional para os três turbos geradores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

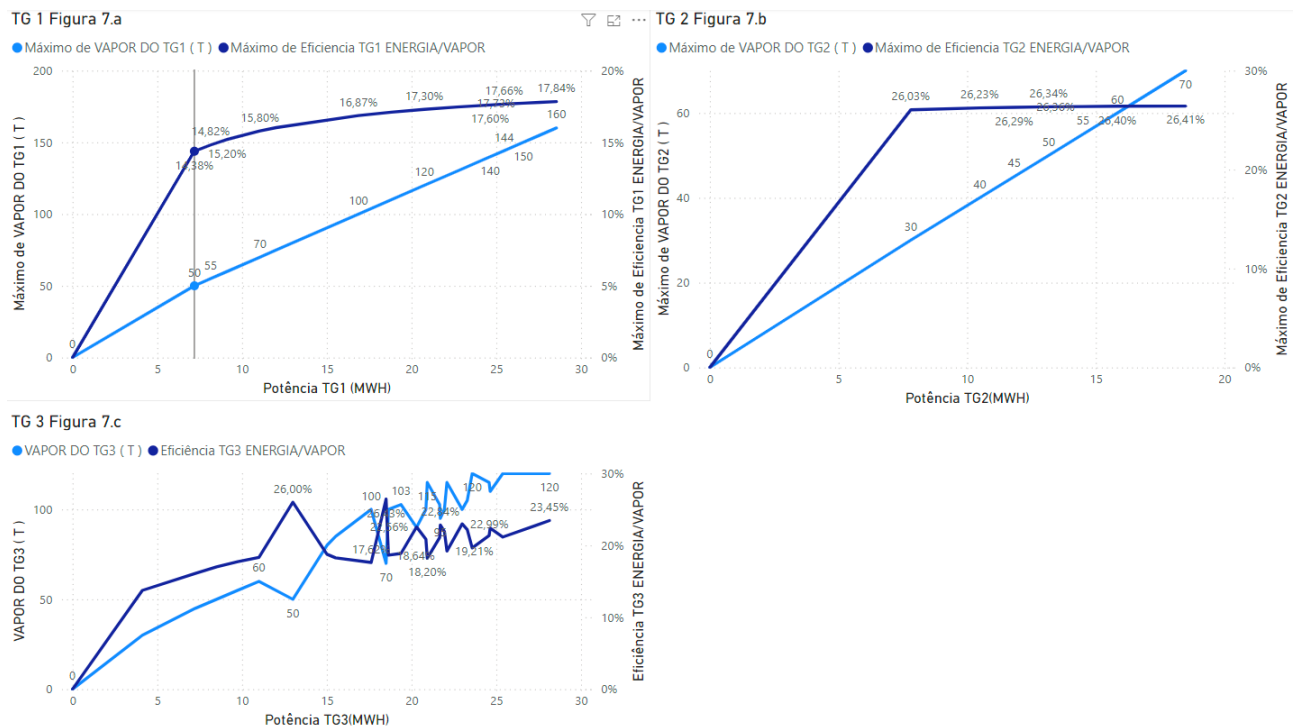
A utilização da linguagem Octave facilitou a implementação do código, permitindo a manipulação de variáveis como a quantidade total de vapor produzido, a entrada de vapor em cada gerador e a energia exportada pelo turbo gerador 3. Os cálculos realizados possibilitaram a determinação da energia total gerada, a eficiência de cada turbo gerador e a comparação com dados reais. O código desenvolvido em Octave calcula a energia gerada em função da quantidade de vapor introduzido

Destaca-se algumas características distintas em comparação com os turbos geradores 1 e 2. Isso ocorre porque o TG3 possui um número maior de variáveis. Assim, a cada quantidade de vapor extraída, a equação sofre alterações, resultando na geração de uma nova equação para cada curva correspondente.

Após a elaboração do código, foi criado um banco de dados contendo possíveis variações na produção de

vapor e na entrada de vapor de cada turbo gerador. Com o banco de dados montado, elaboramos gráficos que nos permitiram analisar o comportamento de cada turbina, onde, na linha azul clara, é representada a quantidade de vapor inserida no turbo gerador, enquanto a linha azul escura indica a energia produzida por tonelada de vapor correspondente a essa entrada.

Figura 7 – Eficiência dos Turbos Geradores



Fonte: Própria, 2024.

A partir do gráfico da (Figura 7.a) do turbo gerador 1, observa-se que o consumo específico diminui à medida que a quantidade de vapor inserido aumenta. Dessa forma, nota-se que a produção de energia por tonelada de vapor tende a aumentar com o incremento na oferta de vapor.

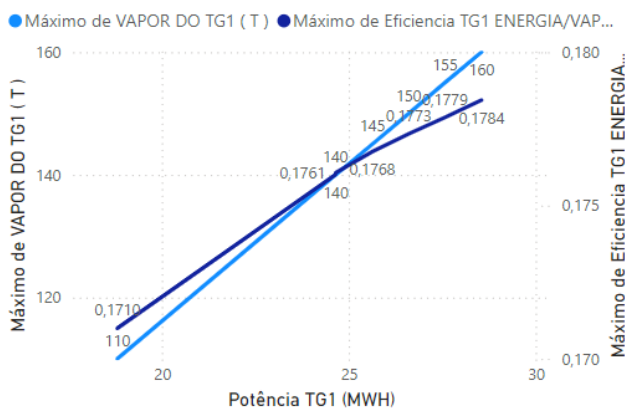
Para a mesma quantidade de vapor, o turbogerador 2 (Figura 7.b) produz significativamente mais energia devido ao seu menor consumo específico do que o turbogerador 1. Além disso, nota-se que a energia produzida por megawatt (mW) por tonelada de vapor permanece quase constante na faixa de 30 a 70 MW.

A eficiência do turbogerador 3 (Figura 7.c), por outro lado, flutua com a quantidade de vapor extraído devido à sua função mista; quanto menor a extração de vapor, melhor a eficiência. Além disso, o turbo gerador 3 possui alguns picos de eficiência, isso se dá por conta da sua máxima condensação que é representada pela linha vermelha representada no gráfico da Figura 5, onde tem a maior produção de energia.

Após a análise, foram identificados os melhores pontos de operação das turbinas, determinando a maior quantidade de energia produzida por tonelada de vapor e filtrando esses dados. Em seguida, aplicamos um novo filtro para verificar a entrega de vapor ao processo da usina

de 200 T e a exportação de energia acima de 30 mW. Com essa filtragem, conseguimos identificar um novo padrão no gráfico.

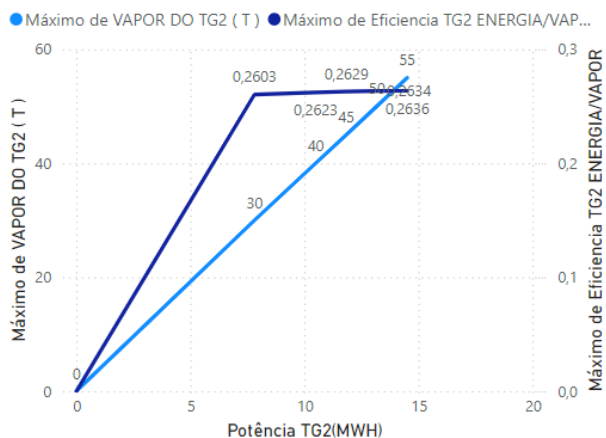
Figura 10 – Máximo Eficiência TG1



Fonte: Própria, 2024.

Logo após a filtragem, observa-se uma mudança no gráfico representado na figura 10, evidenciada pela inversão das linhas. Esse fenômeno ocorre porque, a partir de 140 toneladas de vapor, o turbo gerador 1 está próximo de atingir sua eficiência máxima, mesmo ainda havendo uma quantidade considerável de vapor a ser inserido.

Figura 11 – Máxima Eficiência TG2

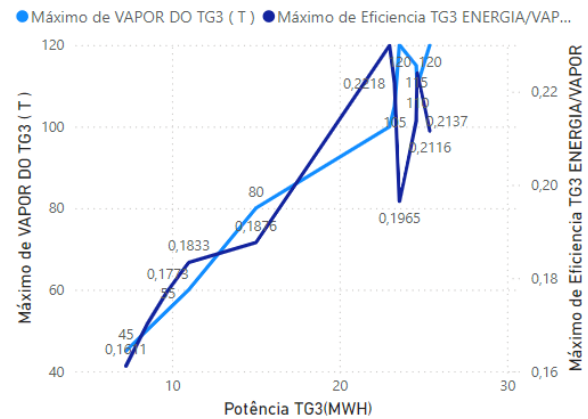


Fonte: Própria, 2024.

No gráfico da figura 11, observa-se que o turbo gerador 2 mantém uma análise semelhante àquela

apresentada no gráfico anterior, antes da filtragem dos dados.

Figura 12 – Máximo Eficiência TG3

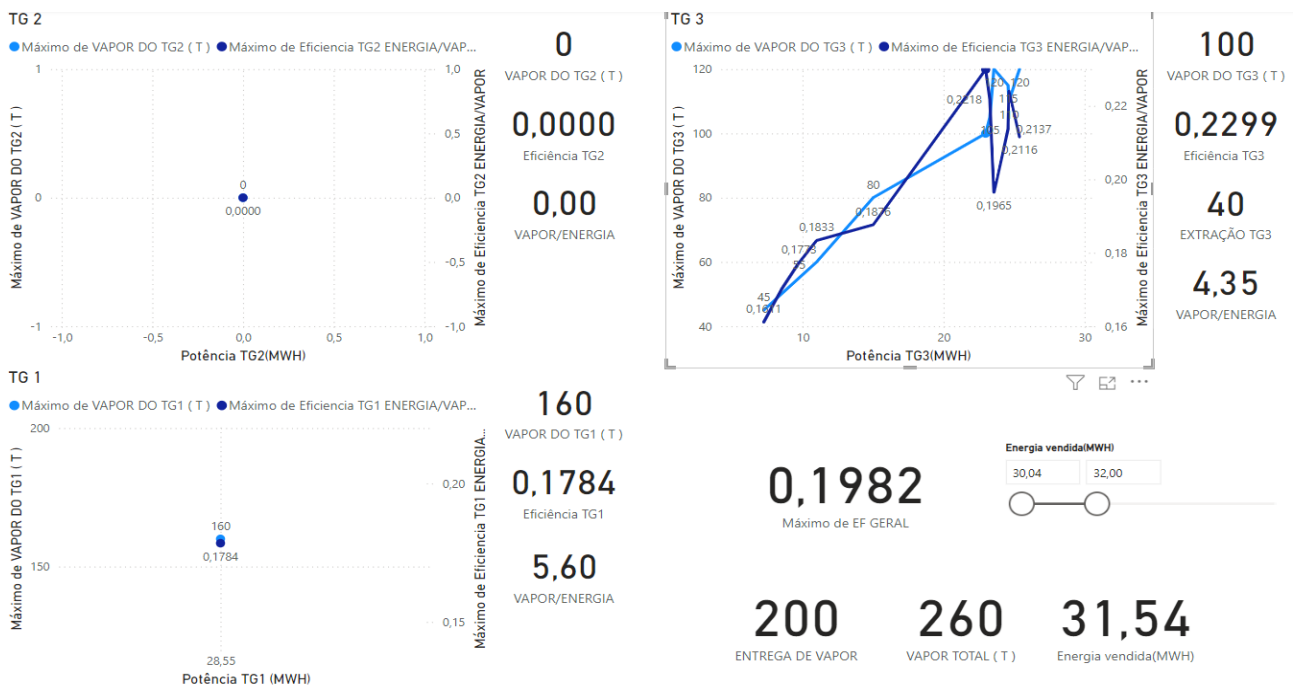


Fonte: Própria, 2024.

No gráfico da figura 12 referente ao turbo gerador 3, observa-se uma queda de eficiência no ponto de 0,1965 resultado da inserção de 120 toneladas de vapor e da extração de 90 toneladas. Essa diminuição na eficiência ocorre porque a maior parte do vapor inserido foi extraída, comprometendo a produção de energia.

Os gráficos foram analisados e foi determinado calcular um valor de eficiência global que incluem os três turbos geradores. Optou-se por calcular a eficiência total, dividindo a energia total produzida pelo total de vapor gerado pela caldeira. Dessa forma, o ponto com a maior produção de energia corresponde ao ponto de maior eficiência entre os três turbos geradores, pois indica que foi obtida uma maior quantidade de energia produzida por tonelada de vapor.

Figura 13 – Ponto Ótimo de Operação



Fonte: Própria, 2024.

Nos gráficos da figura 13 identificamos que o ponto ótimo para 260 toneladas de vapor resulta em uma produção de 0,1982 de eficiência por tonelada de vapor. Para o turbo gerador 3, o melhor desempenho foi observado com a inserção de 100 toneladas de vapor, que gerou 0,2299 de eficiência por tonelada de vapor. No caso do turbo gerador 1, a inserção de 160 toneladas de vapor resultou em 0,1784 de eficiência por tonelada. A análise sugere que, durante os períodos de safra, o turbo gerador 2 é mais eficiente quando operado em standby.

Após essa análise, implementamos um método de comparação, criando um código que funciona como um "loop" para comparar as eficiências dos turbos geradores. Esse código considera os parâmetros de operação, com entrega de 200 toneladas de vapor e exportação de energia variando entre 30 a 32 mW, aumentando a precisão das comparações ao utilizar um conjunto de dados mais amplo do que o que poderia ser feito manualmente.

Equação de Loop:

```
for vapor_produzido = 220:2:280
  for vapor_de_entrada_tg1 = 50:2:160
    for vapor_de_entrada_tg2 = 0:2:70
```

O código em looping itera sobre uma variável chamada vapor_produzido, que varia de 220 a 280, com um incremento de 2. Os valores assumidos por vapor_produzido serão: 220, 222, 224, ..., até 280. Dentro desse loop, há uma repetição sobre a variável vapor_de_entrada_tg1, que vai de 50 a 160, também com um incremento de 2, resultando em valores como 50, 52, 54, ..., até 160. Por fim, o loop mais interno itera sobre a variável vapor_de_entrada_tg2, que varia de 0 a 70, novamente com um incremento de 2, abrangendo valores como 0, 2, 4, ..., até 70.

Para cada valor de vapor_produzido, o código percorre todos os valores possíveis de vapor_de_entrada_tg1. Em seguida, para cada combinação de vapor_produzido e vapor_de_entrada_tg1, ele percorre todos os valores de vapor_de_entrada_tg2.

Especificamente para o turbo gerador 3 (TG3), a quantidade de vapor enviada a ele é calculada como a diferença entre vapor_produzido e a soma de vapor_de_entrada_tg1 e vapor_de_entrada_tg2. Assim, o código gera um total de 62.496 comparações.

Figura 14 – Resultados dos Testes Realizado

Potência Total gerada	51.54 MWh
Potência Vendida	31.54 MWh
Potência Consumida	20 MWh
Vapor utilizado total	260.00 Tv
Vapor utilizado no TG1	160.00 Tv
Vapor utilizado no TG2	0.00 Tv
Vapor utilizado no TG3	100.00 Tv
Vapor utilizado no processo	200.00 Tv
Eficiência TOTAL	0.1982
Eficiência do TG1	0.1784
Eficiência do TG2	NaN
Eficiência do TG3	0.2299
Potência gerada no TG1	28.55 MW
Potência gerada no TG2	0.00 MW
Potência gerada no TG3	22.99 MW
Nº de Testes Realizados	62.496

Fonte: Própria, 2024.

Como demonstrado na figura 14, notamos informações sobre o rendimento energético de um sistema de produção de energia. Inicialmente, nota-se que a potência total gerada totaliza 51,54 MWh, sendo que 31,54 MWh foram comercializados e 20 MWh foram utilizados internamente. A quantidade total de vapor empregada foi de 260,00 Tv, distribuída entre as três turbinas geradoras (TG): 160,00 Tv no TG1, 0,00 Tv no TG2, e 100,00 Tv no TG3. Ademais, foram empregadas 200,00 Tv de vapor no processo, demonstrando perdas ou alternativas de uso. Também são mostradas as eficiências das turbinas, com uma eficiência total do sistema de 0,1982, enquanto o TG1 obteve 0,1784, o TG2 obteve um valor nulo (NaN) e o TG3 obteve 0,2299.

CONCLUSÃO

Foi possível realizar uma análise abrangente dos turbogeradores de contrapressão, condensação e de função mista, ressaltando a importância da coleta de dados precisos. A avaliação das variáveis operacionais, como o total de vapor produzido, a quantidade de vapor destinada ao turbo gerador 1, turbo gerador 2, turbo gerador 3, e a extração de vapor do turbo gerador 3, proporcionou uma compreensão aprofundada da eficiência e do desempenho de cada turbogerador. Isso também estabeleceu uma base sólida para a programação no ambiente Octave.

Os gráficos gerados evidenciam claramente a relação entre a vazão de vapor e a potência, destacando as características operacionais específicas de cada turbogerador. Essa abordagem não apenas facilitou a compreensão do funcionamento dos geradores, mas também ajudou a identificar a configuração operacional mais eficiente.

Os resultados obtidos, reforçam a relevância da análise proposta, que pode servir como referência para futuras otimizações no setor. Este trabalho não apenas contribuiu para o conhecimento acadêmico, mas também oferece percepções práticas que podem ser aplicados na indústria, promovendo a eficiência energética e a

sustentabilidade na operação de sistemas de geração de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVES, J. M. Paradigma técnico e co-geração de energia com bagaço de cana de açúcar em Goiás. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Goiás. Anais... Goiás: Agrener Gd, 2006. p. 1-13.
2. ANDRADE, G. M. Turbogeneradores (Turbinas a vapor, a gás), Turbinas Hidráulicas e Turbinas Eólicas. Departamento de Engenharia Elétrica. Taubaté - SP.
3. SOUZA, C. B.; DIAS, F. F. Atividades de comissionamento de um turbogerador. Departamento de Engenharia Mecânica. Projeto de Pós-Graduação. Vitória – ES, 2009.
4. TGM TURBINAS (Brasil). Manual de Instruções TM 25000 A. 40903. ed. Goiás: TGM Turbinas, 2020. 51 p.
5. NG METALÚRGICA LTDA (Piracicaba). Manual de Instruções: Instalação, Operação e Manutenção: turbina hc-800e. 415732. ed. Goiás: NG Metalúrgica Ltda, 2018.
6. Kok JBW, Haselhoff EA. Thermodynamic analysis of the thermal and exergetic performance of a mixed gas-steam aero derivative gas turbine engine for power generation. Heliyon, 2023.
7. QUARTERONI, A.; SALERI, F.; GERVASIO, P. Scientific Computing with MATLAB and Octave. 3rd ed. Springer, 2010.
8. Zahid N, Sodhro AH, Kamboh UR, Alkhayyat A, Wang L. AI-driven adaptive reliable and sustainable approach for internet of things enabled healthcare system. Math Biosci Eng. 2022
9. Antoniadou I, Dervilis N, Papatheou E, Maguire AE, Worden K. Aspects of structural health and condition monitoring of offshore wind turbines. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2015.
10. Reddy BN, Jalli R, Prudhviraaj KS, Shetty KB, Reddy CR, Kotb H, Emara A, Alruwaili M. Wind turbine with line-side PMSG FED DC-DC converter for voltage regulation. PLoS One. 2024 Jun 28.
11. Site: <https://wortice.com.br/turbinas-a-vapor-de-contra-pressao>.