



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Unidade Araxá**

Gabriel Boaventura Alves Pereira

**AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA EM UM SISTEMA DE
PRODUÇÃO DE ENERGIA USANDO UMA TURBINA A VAPOR DE
UMA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO:
UM ESTUDO DE CASO**

Araxá/MG
2020

Gabriel Boaventura Alves Pereira

**AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA EM UM SISTEMA DE
PRODUÇÃO DE ENERGIA USANDO UMA TURBINA A VAPOR DE
UMA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO:
UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Me. Alexandre Dias Linhares

Araxá/MG
2020



ATA Nº 15/2020 - DFGAX (11.57.03)

Nº do Protocolo: 23062.032265/2020-08

Araxá-MG, 01 de dezembro de 2020.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL / ARAXÁ
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC - ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL
do aluno **GABRIEL BOAVENTURA ALVES PEREIRA**

Às dezessete horas do dia primeiro de dezembro de dois mil e vinte, reuniu-se, pelo Microsoft Teams, na turma "Trabalho de Conclusão de Curso", do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado "Avaliação da potência gerada em um sistema de produção de energia usando uma turbina a vapor de uma planta de ácido sulfúrico: um estudo de caso", como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Me. Alexandre Dias Linhares, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, Gabriel Boaventura Alves Pereira, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: 85/100 (oitenta e cinco pontos). O resultado final foi comunicado publicamente pelo Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificada a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos. A Profa. Dra. Érica Araújo, responsável pela disciplina "Trabalho de Conclusão de Curso II", lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Araxá, primeiro de dezembro de dois mil e vinte.

(Assinado digitalmente em 03/12/2020 12:35)

ALEXANDRE DIAS LINHARES

COORDENADOR - TITULAR

CHEFE DE UNIDADE

CTMECAX (11.50.19)

Matrícula: 1164526

(Assinado digitalmente em 01/12/2020 19:31)

DIEGO ALVES DE MORO MARTINS

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DELMAX (11.57.05)

Matrícula: 3057864

(Assinado digitalmente em 02/12/2020 10:02)

DOMINGOS SAVIO DE RESENDE

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

CEDAX (11.79.30)

Matrícula: 4194738

(Assinado digitalmente em 04/12/2020 17:33)

ERICA DANIELA DE ARAUJO

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DFGAX (11.57.03)

Matrícula: 1019759



(Não Assinado)

GABRIEL BOAVENTURA ALVES PEREIRA

DISCENTE

Matrícula: 201314550233

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **15**, ano: **2020**, tipo: **ATA**, data de emissão: **01/12/2020** e o código de verificação: **fa609c99ca**

Aos meus pais, aos amigos e à minha namorada,
que sempre me fizeram acreditar na realização dos meus sonhos.
AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter permitido que tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais e à minha irmã, por me apoiarem sempre nas minhas decisões e me incentivarem nos momentos difíceis.

À minha namorada Priscila, por ter me ajudado, incentivado e motivado para realizar este trabalho.

Ao professor Alexandre Dias Linhares, pelas correções e ensinamentos que me guiaram meu aprendizado.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo meu processo de aprendizado.

Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.

Thomas Edison

RESUMO

O mundo globalizado necessita, cada vez mais, de energia elétrica para produzir alimentos, materiais e manter a vida como um todo. Nesse contexto, a utilização de meios alternativos de produção energética é de grande interesse, considerando que, hoje em dia, se utilizam diversos métodos de produção que degradam o meio ambiente, tais como: usinas hidrelétricas, nucleares, térmicas, dentre outras. Uma das alternativas criadas para ajudar nessa produção energética é a cogeração. Por esse termo compreende-se um sistema no qual, a partir de uma ou mais fontes de combustíveis, se produz simultaneamente ou sequencialmente múltiplas formas de energia útil. Ante a esse cenário, objetivase, com este trabalho, desenvolver um estudo de caso sobre a potência gerada em uma turbina a vapor de uma planta de ácido sulfúrico localizada no município de Araxá-MG. Por meio da realização de alguns ajustes nessa turbina, a qual apresentava problemas no controle das válvulas de admissão e de extração, além de falhas nas válvulas de injeção de vapor motriz, as quais estavam bloqueadas, intentou-se aumentar a eficiência energética do equipamento. Para solucionar esses problemas, foram ajustados os controles das válvulas de admissão e de extração e substituídas as válvulas de injeção de vapor motriz. Com o estudo de caso desenvolvido, avaliou-se se os ajustes realizados na turbina a vapor dessa planta propiciaram ou não melhorias na eficiência energética do equipamento em questão. Após as análises realizadas durante a pesquisa, observou-se que houve um aumento na produção energética da turbina, porém essa melhora ocorreu em vista, também, de outros fatores avaliados.

Palavras-chave: Ácido sulfúrico. Cogeração. Eficiência Energética. Turbina a Vapor.

ABSTRACT

The globalized world increasingly needs electricity to produce food, materials and maintain life as a whole. In this context, the use of alternative means of energy production is of great interest, considering that, today, several production methods are used that degrade the environment, such as: hydroelectric, nuclear, thermal plants, among others. One of the alternatives created to help in this energy production is cogeneration. This term means a system in which, from one or more fuel sources, multiple forms of useful energy are produced simultaneously or sequentially. In view of this scenario, the objective of this work is to develop a case study on the power generated in a steam turbine of a sulfuric acid plant located in the city of Araxá-MG. By making some adjustments to this turbine, which presented problems in the control of the intake and extraction valves, in addition to flaws in the motive steam injection valves, which were blocked, the intention was to increase the equipment's energy efficiency. To solve these problems, the controls of the intake and extraction valves were adjusted and the motive steam injection valves were replaced. With the developed case study, it was evaluated whether the adjustments made to the steam turbine of this plant led to improvements or not in the energy efficiency of the equipment in question. After the analyzes carried out during the research, it was observed that there was an increase in the energy production of the turbine, however this improvement occurred in view, also, of other factors evaluated.

Keywords: Sulphuric acid. Cogeneration. Energy Efficiency. Steam Turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de uma caldeira aquatubular.....	19
Figura 2 – Bocal de expansão.....	20
Figura 3 – Turbina a vapor.	20
Figura 4 – Ciclo de Rankine ideal.	21
Figura 5 – Diagrama Txs de um ciclo Rankine.	22
Figura 6 – Condensador de Vapor.	23
Figura 7 - Cogeração de energia.....	24
Figura 8 – Sistema de cogeração.	24
Figura 9 – Princípio de funcionamento gerador elétrico.	27
Figura 10 – Turbogenerador Toshiba.....	28
Figura 11 - Transmissor de pressão LD301®, da SMAR.	31
Figura 12 – Tipos de termopares.	32
Figura 13 – Termoresistência tipo Pt-100.	33
Figura 14 – Sensor de vibração VTV122 IFM.....	34
Figura 15 – Unidade Sulfúrico.	36
Figura 16 – Desenho esquemático da turbina.....	38
Figura 17 – Foto da turbina.	38
Figura 18 – Desenho esquemático do rotor.	39
Figura 19 – Rotor da turbina.....	39
Figura 20 – Carcaça inferior da turbina.....	40
Figura 21 – Carcaça superior da turbina.....	40
Figura 22 – Desenho esquemático da válvula de parada e emergência.....	41
Figura 23 – Válvula de parada e emergência.	41
Figura 24 – Desenho esquemático da válvula de controle de vapor.	42
Figura 25 – Válvula de controle de vapor.	42
Figura 26 – Desenho esquemático da válvula de extração.....	44
Figura 27 – Válvula de extração.....	44
Figura 28 – Controlador de velocidade “Woodward 505E”.....	45
Figura 29 – Redutor da turbina.....	45
Figura 30 – Sensor de temperatura da turbina.	46
Figura 31 – Transmissor de pressão turbina.....	47
Figura 32 – Pressostato da turbina.....	48

Figura 33 – Manômetro da turbina.	48
Figura 34 – Sensor de vibração da turbina.	49
Figura 35 – Painel de controle da turbina.	50
Figura 36 – IHM (Interface homem-máquina) da turbina.	50
Figura 37 – Fluxograma do processo de produção de vapor.	52
Figura 38 – Fluxograma de causas e efeitos.	53
Figura 39 – Válvulas de injeção de vapor.	54
Figura 40 – Diagrama h-s dos processos real e isentrópico de uma turbina adiabática.	56
Figura 41 – Diagrama T-s dos processos isentrópico e real.	57
Figura 42 – Geração de energia elétrica pela turbina.	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo de energia em 2018.	51
Gráfico 2 – Energia gerada em 2018.	60
Gráfico 3 – Energia gerada em 2019.	61
Gráfico 4 – Comparação da energia gerada em 2018 e 2019.	62
Gráfico 5 – Comparação do consumo e da energia gerados em 2018 e 2019.	63
Gráfico 6 – Produção por tonelada de H ₂ SO ₄	63
Gráfico 7 – Produção de energia por tonelada de H ₂ SO ₄	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tecnologias de cogeração.	26
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2SO_4	Ácido Sulfúrico
S	Enxofre
O_2	Gás oxigênio
SO_3	Trióxido de enxofre
H_2O	Água
Kg/h	Quilograma por hora
Kgf/cm^2	Quilograma força por centímetro quadrado
Hz	Hertz
Rpm	Rotações por minuto
MWh	Megawatt hora
t/d	Toneladas por dia
t/m^3	Toneladas por metro cúbico

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Ácido Sulfúrico	17
2.2	Máquinas Térmicas.....	18
2.2.1	Gerador de vapor de água (caldeira).....	18
2.2.2	Turbina a Vapor.....	19
2.3	Ciclo Rankine	21
2.3.1	Condensador de vapor	22
2.4	Cogeração	23
2.4.1	Vantagens da cogeração	25
2.4.2	Gerador elétrico	26
2.5	Instrumentação.....	29
2.5.1	Definições Gerais	29
2.5.2	Sensores e transmissores de pressão.....	30
2.5.3	Sensores e transmissores de temperatura.....	31
2.5.4	Sensores de vibração	33
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Unidade de análise e observação	35
3.2	Técnica de coleta de dados	36
3.3	Análise do Equipamento.....	37
3.3.1	Rotor e Carcaça	38
3.3.2	Válvula combinada de parada e emergência	40
3.3.3	Válvula de controle de vapor	42
3.3.4	Válvula de extração controlada	43
3.3.5	Controle de velocidade	44
3.3.6	Instrumentação da turbina	46
4	ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	51
4.1	Análise da produção energética.....	51
4.2	Análise da causa raiz	52
4.3	Ajustes no equipamento	53
4.4	Discussão sobre os resultados obtidos.....	55
4.4.1	Análise do rendimento isentrópico da turbina.....	55
4.4.2	Análise do consumo de energia	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Após a Primeira Revolução Industrial, segundo Ferrão e Weber (2001), o mundo se desenvolveu tecnologicamente a uma velocidade extraordinária, apesar de um dos custos desse alto crescimento ser a utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia. Nesse cenário, a energia elétrica se tornou um recurso extremamente importante para que mantivessem e continuassem os desenvolvimentos e, conseqüentemente, se tornou um dos maiores desafios para os técnicos e os engenheiros da área, visto que sua obtenção era basicamente advinda da utilização de combustíveis fósseis (PIRES; MULLER; SUARES, 2013).

Desse modo, em função do emprego de recursos não renováveis para a produção de energia elétrica, tais como petróleo, carvão, gás natural, urânio para a energia nuclear, ao longo da história, tem-se gerado cada vez mais uma maior emissão de gases poluentes, além de aumentar o efeito estufa e, por conseguinte, colocar em risco a sustentabilidade do planeta (NASCIMENTO; MENDONÇA; CUNHA, 2012). Sobre isso, Ferrão e Weber (2001) assinalam que a utilização dessas matérias-primas não renováveis para a obtenção de energia elétrica torna a civilização moderna bastante vulnerável, dado que, no decorrer dos anos, esses recursos, em determinado momento, irão se esgotar, além de proporcionarem a liberação de milhares de toneladas de gases na atmosfera. Dito isso, é notório o fato de que a sociedade atual, no decorrer dos anos, após a Revolução Industrial, se edificou de modo dependente de recursos não renováveis, o que não pode ser sustentado por mais séculos.

Diante desse contexto, para mudar a situação mundial relacionada à produção de energia, a utilização de fontes renováveis irá garantir eficiência energética formando um novo alicerce para a matriz energética mundial (LORENZO; ARAÚJO, 1994). Nessa medida, o aproveitamento do vento, da biomassa, do sol e de pequenas reservas hídricas são alternativas não poluentes e economicamente viáveis de fontes renováveis (SOUSA, 1993). Levando em conta essa conjuntura, uma das alternativas empregadas para o aproveitamento de um determinado recurso e a produção de outro é a cogeração. Essa, de acordo com França (2008), compreende o processo de produção e de uso, de duas ou mais utilidades combinadas, na maioria das vezes, energia elétrica e térmica, a partir da energia disponibilizada de um ou mais combustíveis. Em outros termos, trata-se de um processo que permite, por exemplo, o aproveitamento da energia térmica proveniente de combustíveis utilizados em um processo produtivo. Logo, a energia primária é aproveitada no processo e utilizada para a produção de outra, no caso, energia elétrica.

Na esteira dessas considerações, objetiva-se, com este trabalho, realizar um estudo de caso¹ sobre a potência gerada em uma turbina a vapor de uma planta de ácido sulfúrico da Mosaic Fertilizantes, no município de Araxá-MG. O interesse por esta pesquisa surge em decorrência do seguinte questionamento: é possível melhorar a potência gerada, em um sistema de produção de energia, utilizando essa turbina a vapor, haja vista os ajustes realizados nas válvulas de admissão, de extração e de injeção? Ante a esse questionamento, aventa-se como hipótese de pesquisa que, com esses ajustes, será possível aumentar a potência gerada pela turbina a vapor e, conseqüentemente, diminuir os gastos com energia elétrica dessa empresa. Para tanto, estabeleceu-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Compreender o funcionamento da turbina a vapor, instalada na planta da empresa Mosaic Fertilizantes, em Araxá-MG, e documentar os dados de produção energética do equipamento;
- Implementar ajuste nas válvulas de admissão, de extração e de injeção dessa turbina a vapor;
- Documentar a produção energética da turbina a vapor antes dos ajustes realizados;
- Analisar se os ajustes propiciaram melhorias de desempenho do equipamento, haja vista os dados de produção energética anteriormente coletados.

Segundo informações obtidas junto à Mosaic Fertilizantes, o sistema de cogeração instalado na unidade de produção de ácido sulfúrico da empresa, o qual possui duas turbinas instaladas, foi elaborado com o intuito de diminuir os custos de produção, gerando energia elétrica para o consumo tanto da própria unidade quanto de todo o Complexo Minerquímico de Araxá (CMA), tornando-o quase autossuficiente. Para garantir a plena produção de energia elétrica, as turbinas a vapor, objeto de análise neste estudo, precisam estar em boas condições de funcionamento. Tendo isso em vista, este estudo de caso se justifica na medida em que poderá propiciar melhorias na eficiência energética da empresa, haja vista a maior disponibilidade operacional do equipamento e a maior confiabilidade em seu funcionamento. Logo, gerará retorno financeiro, devido à maior eficiência energética produzida. Ademais, contribuirá para a preservação do meio ambiente, pois serão necessários menos recursos naturais para produzir o mesmo volume de energia.

A fim de realizar a investigação aqui apresentada, este trabalho está estruturado em três capítulos, além desta introdução e das considerações finais. No segundo capítulo,

¹ Método de pesquisa por meio do qual se analisa dados qualitativos coletados em eventos reais, com o intuito de explicar, explorar, descrever ou melhorar um fenômeno em análise (YIN, 2001).

apresenta-se a fundamentação teórica abordando os principais conceitos implicados nessa proposta de pesquisa, entre eles, cita-se Máquinas Térmicas, Ciclo Rankine, Cogeração e Instrumentação. No terceiro capítulo, detalha-se a Unidade de Análise e Observação; a Técnica de Coleta de Dados e uma análise do equipamento detalhando suas principais características. No quarto capítulo, analisa-se os dados coletados antes e depois dos ajustes aplicados na turbina a vapor e discute-se os resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo elucidar os principais temas e conceitos relacionados ao tema foco deste trabalho. Os tópicos abordados são: ácido sulfúrico, máquinas térmicas, ciclo Rankine, cogeração e instrumentação.

2.1 Ácido Sulfúrico

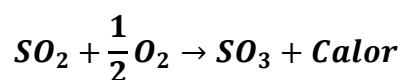
De acordo com Sousa (1996), um dos produtos químicos mais importantes fabricados pelo homem é o ácido sulfúrico (H_2SO_4), isso porque grande parte dos produtos industriais fabricados possui, direta ou indiretamente, ácido sulfúrico em sua composição. Cita-se, como exemplo: corantes, tintas, detergentes, fertilizantes, baterias de automóveis, entre outros.

O ácido sulfúrico é conhecido pelo homem desde o século X e, dentre as técnicas criadas para fabricá-lo, destacam-se o processo de câmara de chumbo e o processo de contato (CAMPOS, 2011). O primeiro processo foi bastante utilizado no século XIX, porém caiu em desuso, devido à sua limitação, dado que, por meio dele, não é possível produzir ácido sulfúrico com concentração acima de 78% (MB CONSULTORES, 1999). Em vista disso, segundo Campos (2011), praticamente toda a produção mundial de ácido sulfúrico utiliza o método por contato. Esse método consiste nas seguintes etapas, descritas com suas respectivas reações:

- Obtenção do dióxido de enxofre (SO_2) a partir da reação de combustão do enxofre.



- Conversão catalítica do dióxido de enxofre em trióxido de enxofre (SO_3).



- Absorção do trióxido de enxofre.



Ante a esse detalhamento, ressalta-se que o processo de produção de ácido sulfúrico é extremamente exotérmico, ou seja, há uma grande liberação de calor em cada etapa de seu processo e, em função disso, é necessário ter um rigoroso controle de temperatura e de pressão para produzir a maior quantidade de vapor e obter a máxima conversão de dióxido

de enxofre e absorção de trióxido de enxofre (CHAGAS, 2019). Para se obter uma grande quantidade de vapor no sistema de fabricação de ácido sulfúrico, utilizam-se máquinas térmicas. Dentre essas máquinas, destaca-se a turbina, que é essencial para o funcionamento do sistema.

2.2 Máquinas Térmicas

As máquinas térmicas, segundo Sandfort (1965), são equipamentos que convertem a energia do calor em energia mecânica ou calorífera. Essas máquinas possuem como características receberem calor de uma fonte quente, seja ela uma fornalha, uma caldeira, um reator nuclear, e funcionarem por ciclos. São exemplos de máquinas térmicas: turbinas a gás, turbinas a vapor, motores a combustão externa (locomotivas a vapor), motores a combustão interna, ar refrigerado, geladeiras, entre outros.

A fim de melhor contextualizar as máquinas térmicas envolvidas no processo em análise neste trabalho, aborda-se, na sequência, as principais máquinas utilizadas em usinas que possuem turbinas a vapor e operam segundo o ciclo Rankine, o qual é detalhado mais adiante (CASTRO, 2009).

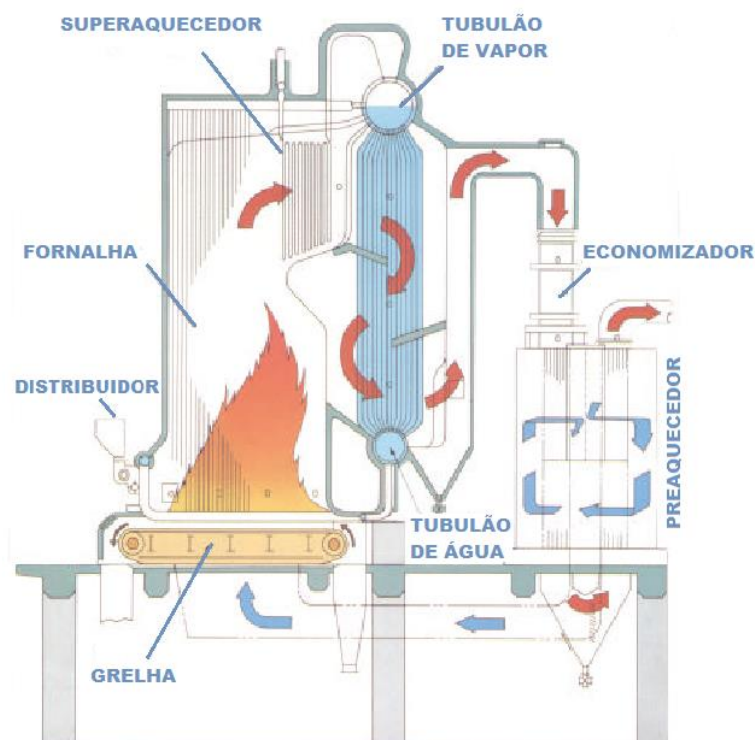
2.2.1 Gerador de vapor de água (caldeira)

A caldeira, também denominada gerador de vapor, é um equipamento térmico cuja finalidade consiste em transformar a água líquida em vapor, utilizando o calor obtido pela queima de um combustível (IENO; NEGRO, 2004). Esse combustível pode ser, por exemplo, GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), óleo, lenha etc. Para Sandfort (1965), os diversos combustíveis distribuídos sobre a terra, que podem ser empregados como fonte de energia, fazem com que as máquinas térmicas tenham enorme importância nos processos produtivos, haja vista serem bem adaptáveis a contextos variados.

De acordo com Ieno e Negro (2004), as caldeiras podem ser classificadas em flamotubulares e aquatubulares. Nas flamotubulares, empregadas para pequena produção de vapor (menor que 20000 kg/h e pressões menores que 20 kgf/cm²), o calor passa por dentro das tubulações e a água fica por fora dos tubos. As aquatubulares, por sua vez, basicamente, são constituídas por dois tubulões horizontais, interligados por tubos verticais, formando duas paredes. Nas aquatubulares, a água entra na caldeira através de um tanque de alimentação, sendo retirada dele por meio de uma bomba. A água fica armazenada no tubulão

de vapor superior e, dele, passa por tubos da parede traseira até o tubulão inferior. Nesse processo, acendem-se os maçaricos, e o calor resultante da queima do combustível aquece a água do tubulão inferior, produzindo vapor. O vapor produzido é direcionado pelos tubos de vaporização da parede frontal, recebendo mais calor e conduzindo para fora da caldeira na forma de vapor saturado. A Figura 1 mostra um desenho esquemático do funcionamento de uma caldeira aquatubular.

Figura 1 – Desenho esquemático de uma caldeira aquatubular.

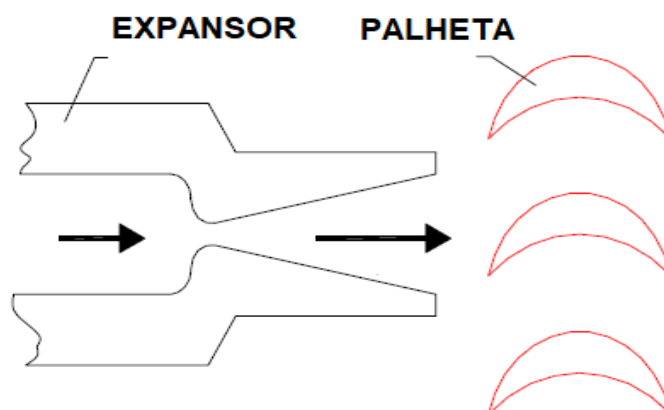


Fonte: Adaptado de Alverichi (2013).

2.2.2 Turbina a Vapor

A turbina a vapor é uma máquina térmica que transforma a energia do vapor, sob forma de energia cinética, em trabalho mecânico (FERRAZ, 2008). Esse trabalho pode ser utilizado, por exemplo, para movimentar um motor. O vapor produzido pela caldeira passa por um bocal de expansão (cf. Figura 2), com o formato de um tubo convergente. Ao passar por ele, diminui a pressão do vapor e, conseqüentemente, aumenta sua velocidade e seu volume. Esse vapor, em alta velocidade, é direcionado para uma superfície sólida, um perfil aerodinâmico chamado de palhetas da turbina, para provocar movimento (IENO; NEGRO, 2004). Esse princípio é utilizado para movimentar uma turbina.

Figura 2 – Bocal de expansão.



Fonte: Adaptado de Ferraz (2008).

Com o intuito de melhor detalhar a turbina a vapor, na Figura 3, mostra-se uma turbina de múltiplos estágios. Observe: os bocais de expansão constituem a parte fixa da turbina e as palhetas a parte móvel. Os bocais são instalados paralelamente, formando um disco preso na carcaça da turbina. O vapor que sai de cada bocal passa pelas palhetas (cf. Figura 2), as quais são agrupadas, prendendo-se ao eixo da turbina (IENO; NEGRO, 2004). A pressão diminui no sentido do movimento do eixo e o volume aumenta nesse mesmo sentido.

Figura 3 – Turbina a vapor.



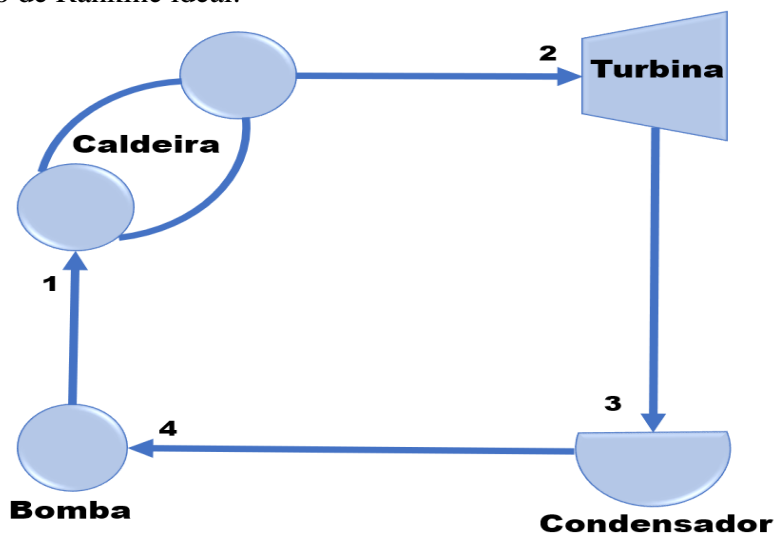
Fonte: NG Metalúrgica (2020).

2.3 Ciclo Rankine

O conjunto formado por uma caldeira, uma turbina, um condensador e uma bomba, ligados em série, constitui um ciclo termodinâmico fechado denominado ciclo Rankine (IENO; NEGRO, 2004). Esse ciclo obtém sua eficiência máxima por meio do Ciclo de Carnot, no qual o fluido de trabalho segue em um ciclo fechado e é constantemente reutilizado, nomeado também como ciclo perfeito ou ideal.

O ciclo ideal é composto por quatro processos que ocorrem em regime permanente (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009), conforme ilustra a Figura 4, quais sejam: o estado 1 é líquido saturado; o estado 2 é vapor superaquecido; o estado 3 é mistura saturada ou superaquecida e o estado 4 é líquido saturado ou comprimido.

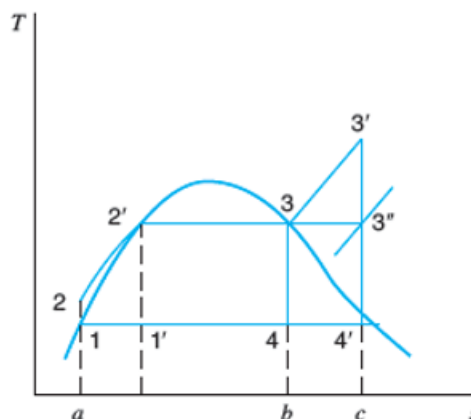
Figura 4 – Ciclo de Rankine ideal.



Fonte: Adaptado de Borgnakke e Sonntag (2009).

Ademais, na Figura 4, ilustra-se as fases da água nesse processo, a saber: (i) de 4-1 acontece o processo de bombeamento adiabático reversível na bomba; (ii) de 1-2, a transferência de calor a pressão constante na caldeira; (iii) de 2-3, a expansão adiabática reversível na turbina; e (iv) de 3-4 ocorre a transferência de calor a pressão constante no condensador (SILVA, 2013). Os processos descritos acima são representados pelo diagrama de temperatura x entropia ($T_x s$), expressos na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama Txs de um ciclo Rankine.



Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

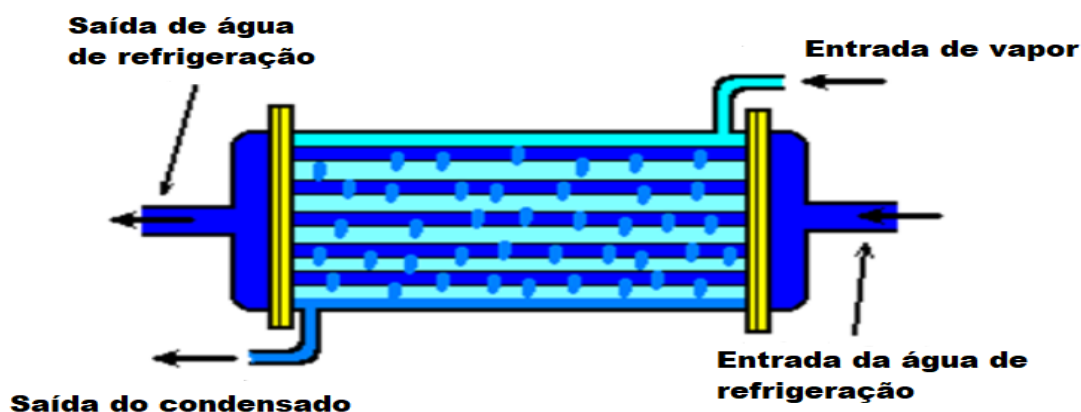
Analisando esse diagrama, o processo de 1-2 representa a água na fase líquida que sai da bomba e é comprimida até o estado 2. Em um ciclo ideal, o processo é reversível e adiabático, portanto, configura-se em uma linha vertical. A água no estado de líquido comprimido entra na caldeira, local em que é aquecida, saindo como vapor superaquecido no estado 3'. Esse vapor superaquecido sai do estado 3' e entra na turbina, situação em que é expandido e movimenta seu eixo para produzir trabalho, normalmente, acoplado a um gerador elétrico. O processo na turbina, idealmente, é adiabático e reversível, portanto, é representado por uma linha vertical 3'-4' no diagrama Txs, conforme a Figura 5. A água que sai da turbina no estado 4' vai para o condensador, cuja função é resfriar o vapor para o estado líquido a temperatura ambiente. Por fim, o vapor, já no estado líquido, sai do condensador no estado 1 e entra, novamente, na bomba, reiniciando o ciclo.

Por meio da caldeira instalada para aproveitar a energia gerada no processo de fabricação de ácido sulfúrico, é possível realizar o aproveitamento da energia térmica do vapor e obter um sistema de cogeração de energia. Esse sistema aproveita o movimento gerado pelo rotor de uma turbina para movimentar um gerador e, assim, obter energia elétrica.

2.3.1 Condensador de vapor

Após o aproveitamento do vapor para transformar a energia térmica em energia mecânica, o vapor que sai da turbina a baixa pressão deve ser enviado a um condensador. A finalidade do condensador é transformar vapor em líquido, por meio da retirada de calor (CASTRO, 2009). Confira, na Figura 6, a ilustração de um condensador de vapor.

Figura 6 – Condensador de Vapor.



Fonte: Garcia (2013).

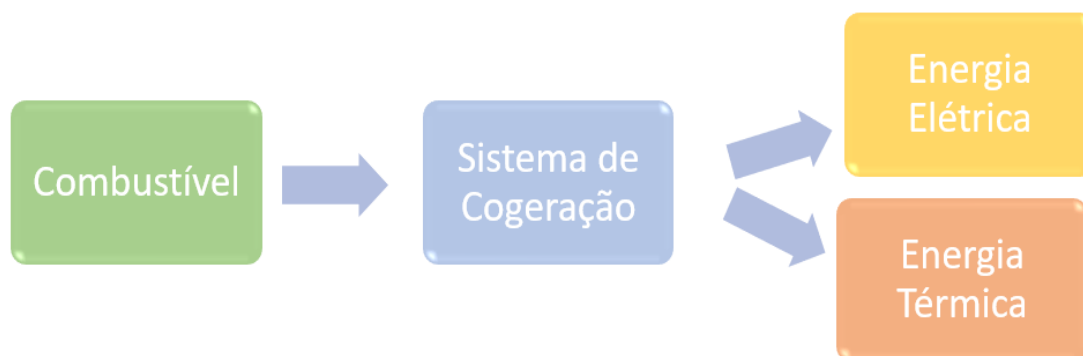
Conforme Ieno e Negro (2004), o vapor que entra no condensador, troca calor com um fluido externo mais frio e se transforma em líquido. Basicamente, o condensador, tal qual representado na Figura 6, é constituído por vários tubos nos quais percorrem água a baixa temperatura. Externamente aos tubos, passa o vapor a uma temperatura mais elevada. O calor é trocado pelos fluidos em virtude da diferença de temperatura e o vapor é condensado, podendo ser reaproveitado no sistema.

2.4 Cogeração

Há indústrias que geram, em seus processos produtivos, como subprodutos, combustíveis de baixo valor ou, até mesmo, poluentes. Em muitos casos, esses subprodutos podem ser reaproveitados na produção de energia, isso ocorre, por exemplo, em setores como de açúcar e álcool, de papel e de celulose, entre outros (BRASIL, 2005). É nesse cenário que surgiu a cogeração, isto é, a geração simultânea de múltiplas formas de energia útil, normalmente energia elétrica e térmica, em um sistema integrado, a partir de uma única fonte primária (CASTRO, 2009).

Esse sistema, definido em língua inglesa como CHP (*Combined Heat and Power*), possui como principal vantagem o maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção e aproveitando ao máximo o conteúdo energético de uma fonte (BRASIL, 2005). Na Figura 7 expõe-se, de uma forma simplificada, o funcionamento desse sistema.

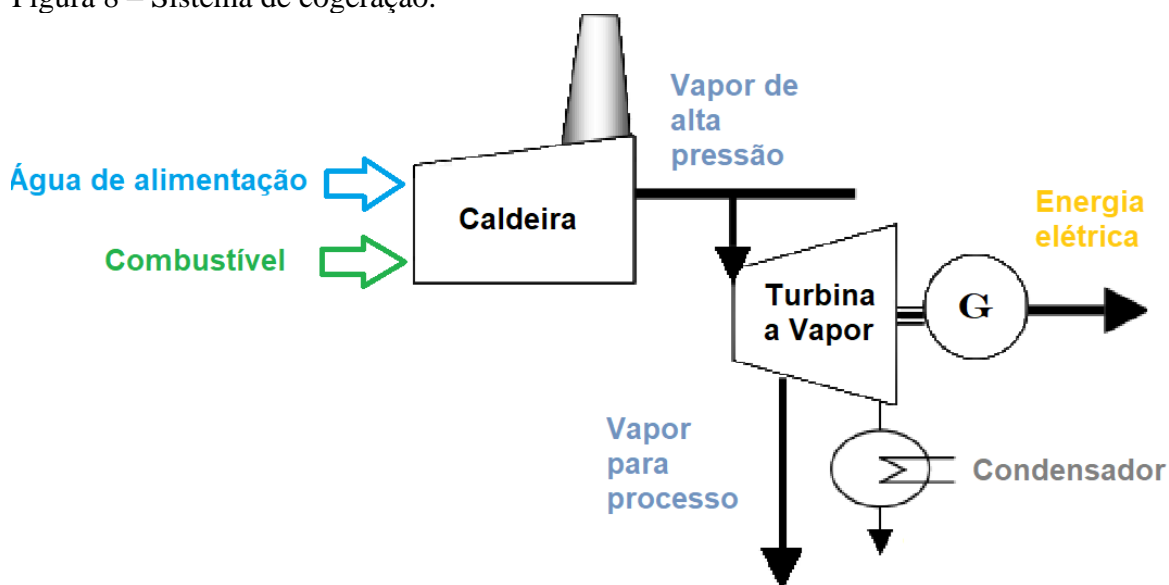
Figura 7 - Cogeração de energia.



Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

Ressalta-se, conforme Brasil (2005), que as plantas de cogeração mais comuns são aquelas que empregam o ciclo termodinâmico Rankine, especificado anteriormente. Detalha-se, na Figura 8, um sistema de cogeração utilizando turbina a vapor e caldeira, haja vista ser esse sistema foco de análise neste trabalho.

Figura 8 – Sistema de cogeração.



Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

Na Figura 8, um combustível é introduzido para queima em uma caldeira, junto com água, momento em que é gerado vapor a alta pressão, o qual é levado para a turbina a vapor. Esse combustível pode ser bagaço de cana, lenha, carvão, gás, entre outros. No caso deste trabalho, o vapor é gerado pelo calor fruto da reação entre dióxido e trióxido de enxofre. A turbina, operada pelo vapor, faz com que gire seu eixo, acionando o gerador elétrico

(representado pela letra G na Figura 8), o qual produz energia elétrica. Parte do vapor é extraído para ser utilizado no processo da planta, denominado vapor para processo, já o que sai da turbina é transferido para o condensador.

2.4.1 Vantagens da cogeração

Segundo Brasil (2005), há várias vantagens na instalação de sistema de cogeração para a indústria. O autor salienta que o custo de energia agregado ao valor final do produto pode ser bastante alto, sendo assim, a primeira vantagem que vem à tona com a implementação de um sistema de cogeração é a redução dos custos operacionais, de modo que essa redução, aumentando a eficiência do aproveitamento de energia adquirido, é sempre atraente.

Como segunda vantagem, o autor ressalta a questão da confiabilidade, uma vez que o sistema de cogeração, além de ajudar, pelo menos em parte, a suprir a necessidade de energia elétrica para manter em funcionamento as unidades de produção, é atrativo para consumidores e para a sociedade em momentos em que o setor elétrico sofre com baixos investimentos na geração e na distribuição, podendo não conseguir suprir a demanda de energia para alimentar uma cidade, por exemplo, causando um déficit de geração e problemas de transporte.

Como terceira vantagem na instalação de sistema de cogeração pela indústria, destaca-se a questão ambiental (PIRES; MULLER; SUARES, 2013). Segundo Ferrão e Weber (2001), as usinas termelétricas convencionais, queimando combustíveis fósseis, têm uma eficiência térmica na ordem de 30% a 40%, isto é, somente essa porcentagem da energia contida no combustível é convertida em energia elétrica. Além disso, os autores ressaltam que essa queima de combustível é responsável pela liberação de dióxido de carbono, que é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. O sistema de cogeração, por seu turno, possui uma eficiência energética que pode chegar até 85%, além de reduzir o impacto ambiental relacionado às emissões gasosas. Ainda relacionado à vantagem ambiental, uma empresa, mesmo não obtendo resultados representativos na redução de seu custo, recorre à cogeração com o intuito de beneficiar sua imagem junto ao mercado, dado que ela vende para a sociedade a imagem de que é uma empresa tecnológica e preocupada com o meio ambiente (PIRES; MULLER; SUARES, 2013).

Segundo Castro (2009), existem diversos modelos de sistemas de cogeração, os quais se classificam de acordo com os tipos de máquinas térmicas que empregam. O autor ressalta que, dentre elas, podem-se utilizar sistemas com motores alternativos (de explosão ou de

compressão interna) ou com turbinas (a gás ou a vapor), além de outros como microturbinas e pilhas de combustível. No Quadro 1, mostra-se, resumidamente, as vantagens e as desvantagens para cada um desses tipos de tecnologia aplicados na cogeração.

Quadro 1 – Tecnologias de cogeração.

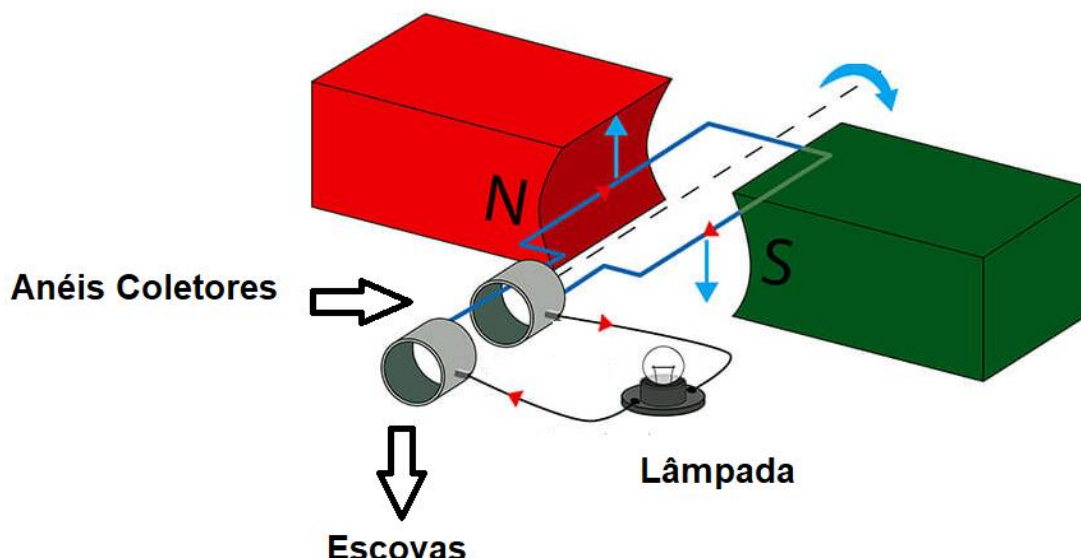
Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Turbinas a gás	-Alta confiabilidade -Baixa emissão de poluentes -Não necessita de refrigeração	-Operação com gás a alta pressão -Rendimento reduzido a carga parcial -Ineficiente em processos com pouca necessidade térmica
Motores de explosão Motores de combustão interna	-Alto rendimento elétrico -Bom desempenho com carga parcial -Arranque rápido -Operação com gás a baixa pressão	-Custos de manutenção elevados -Calor de baixa temperatura -Emissões de poluentes elevadas -Necessita de refrigeração -Ruído de baixa frequência
Turbinas a vapor	-Rendimento global elevado -Operação com diversos tipos de combustíveis -Grandes quantidades de calor disponíveis -Vida útil e confiabilidade elevadas -Vapor a alta pressão	-Arranque lento -Baixo rendimento elétrico
Microturbinas	-Dimensões compactas -Peso reduzido -Baixa emissão de poluentes -Não necessita de refrigeração	-Custos elevados -Calor de baixa temperatura -Tecnologia em manutenção
Pilhas de combustível	-Baixa emissão de poluentes -Baixo ruído -Não possui peças rotativas -Modularidade	-Custos elevados -Confiabilidade incerta -Tecnologia em maturação

Fonte: Adaptado de Brasil (2005).

2.4.2 Gerador elétrico

De acordo com Champman (2013), uma máquina elétrica, que converte a energia mecânica em energia elétrica, é denominada gerador elétrico. Partindo dessa definição, apresenta-se, na Figura 9, o princípio de funcionamento do gerador elétrico.

Figura 9 – Princípio de funcionamento gerador elétrico.



Fonte: TecnoGera (2015).

O gerador elétrico, conforme Pires, Muller e Suares (2013), é constituído de uma espira plana, a qual gira por meio da ação de um campo magnético uniforme, representado pelos polos norte e sul do ímã. Os terminais da espira são conectados a dois anéis coletores (Figura 9), que estão ligados ao circuito externo. Essas espiras giram em torno de um eixo perpendicular na direção das linhas de força do campo magnético aplicado. A variação do valor do fluxo magnético que atravessa a espira gera uma força eletromotriz. Essa força eletromotriz é resultante do movimento relativo que ocorre entre a espira e o campo magnético, produzindo uma corrente alternada nas escovas, representadas por gerador AC (Corrente Alternada).

Nas centrais térmicas e nas plantas nas quais se utilizam o sistema de cogeração, os geradores recebem o nome de turbogeradores (cf. Figura 10). Nesses, o movimento proporcionado pelo eixo da turbina gira o seu eixo, gerando energia elétrica (PIRES; MULLER; SUARES, 2013).

Figura 10 – Turbogenerador Toshiba.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com WEG (2014), em sua grande maioria, os turbogeradores são construídos com dois ou quatro polos, proporcionando alta rotação em seu eixo. Salienta-se que, como no Brasil a frequência da rede elétrica é de 60Hz, essa rotação varia entre os valores de 1800 rpm e 3600 rpm.

As empresas, em geral, utilizam-se dessas máquinas devido à necessidade de se ter o maior aproveitamento da rotação proporcionada pelas turbinas e à necessidade de se gerar menores perdas de energia térmica, fazendo com que o rendimento do sistema chegue a valores próximos de 96% (PIRES; MULLER; SUARES, 2013). O Turbogenerador, ilustrado na Figura 10, possui as seguintes características construtivas:

- **Estator:** é a parte ativa estática. Consiste em um pacote laminado de chapas de aço silício, as quais possuem ranhuras em que são alojadas as bobinas que formam os enrolamentos.
- **Rotor:** compreende as partes ativas giratórias, compostas por um pacote de chapas de aço prensado, o enrolamento de campo e o enrolamento de amortecimento.
- **Carcaça:** possui como função principal apoiar e proteger o turbogerador.

- **Mancais de rolamentos:** são normalmente constituídos de rolamentos de esferas ou de rolos cilíndricos.
- **Mancais de deslizamentos:** podem ter autolubrificação ou lubrificação forçada.
- **Excitatriz (sem escovas):** possui uma excitatriz principal girante instalada em um compartimento na sua parte traseira.
- **Excitação *brushless* com excitatriz auxiliar (PGM):** o PGM (*Permanent Magnet Generator*) é um pequeno gerador incorporado, com a função de alimentar o circuito de potência do regulador de tensão.
- **Excitação *brushless* sem excitatriz auxiliar:** não possui a excitatriz auxiliar (PGM) e o circuito de potência do regulador de tensão é alimentado por meio do transformador de excitação, conectado aos terminais principais do turbogerador.

2.5 Instrumentação

2.5.1 Definições Gerais

Em qualquer processo industrial, há a necessidade de controlar determinadas variáveis, sejam elas pressão, vazão, temperatura, nível, pH etc. A ciência que desenvolve e aplica técnicas de medição, controle e indicação para essas variáveis de processo pode ser definida como instrumentação (SILVA JÚNIOR, 2015). De acordo com Bega (2011), os diversos instrumentos industriais existentes podem ser classificados, basicamente, em três grupos, a saber: indicadores, transmissores e controladores.

- **Indicadores:** são instrumentos cuja função é indicar o valor de uma variável medida e/ou controlada de um processo industrial, que dispõem de um indicador e/ou uma escala graduada (BEGA, 2011).
- **Transmissores:** são dispositivos utilizados para amplificar e formatar sinais advindos da variável medida e/ou controlada e transmitida à distância (BEGA, 2011). O sinal, lido pelo transmissor, vem de um elemento primário de medição (sensor), o qual pode estar ou não acoplado ao medidor.
- **Controladores:** é o instrumento que compara os valores da variável medida e/ou controlada com um valor desejado, denominado *Set Point*, e fornece um sinal de saída, para exercer uma ação de controle na variável manipulada de modo a manter esse sinal estável (BEGA, 2011).

2.5.2 Sensores e transmissores de pressão

A pressão de um fluido, conforme Bega (2011), é a ação de uma força contra uma força contrária. As aplicações dessa variável na indústria são primordiais, pois ela pode ser usada como medição direta de grandeza ou como medição de nível. Define-se, portanto, pressão como uma força perpendicular e uniformemente distribuída sobre uma superfície plana ou, resumidamente, uma força aplicada dividida pela área, tal como pode ser verificado na Equação 1:

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

Onde:

- P é a pressão resultante;
- F é a força aplicada;
- A é a área de aplicação da força.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade padrão para pressão é o Pascal, a qual representa 1 Newton por 1 metro quadrado.

Normalmente, na indústria, utilizam-se sensores de pressão com diferentes princípios de funcionamento. Devido a essa grande variedade, o usuário pode escolher e especificar o instrumento mais adequado para as suas necessidades. Para isso, são considerados fatores como: o tipo de material que será medido (fluido, sólido, gasoso), a condição de instalação (ambiente corrosivo, abrasivo), entre outros.

De modo geral, os sensores de pressão “sentem” a pressão do processo por meio da deformação de algum material, conhecido como elemento sensor (SILVA JÚNIOR, 2015). O elemento sensor mais comum é a célula capacitiva, utilizada por diferentes fabricantes como SMAR, Rosenmount, Yokogawa, entre outros. Na Figura 11, ilustra-se um sensor de pressão modelo LD301 da SMAR, cujo elemento sensor é a célula capacitiva.

Figura 11 - Transmissor de pressão LD301®, da SMAR.



Fonte: Smar Technology Company (2020).

2.5.3 Sensores e transmissores de temperatura

A temperatura, junto com pressão, nível e vazão, é uma das principais variáveis de processo. Monitorar a temperatura, em algum equipamento ou processo, garante que esses não excedam seus limites de trabalho pré-estabelecidos, de modo a serem sempre efetivos, além de promover segurança operacional, protegendo com alarmes de alguma temperatura excessiva.

Segundo Bega (2011), a utilização dessa variável na indústria envolve uma série de aplicações, que abrangem desde processos físicos e químicos, até proteção de equipamentos. Existem, basicamente, dois sensores mais utilizados no controle dessa variável, quais sejam: os termopares e as termoresistências.

Termopares

Os termopares, representados na Figura 12, são sensores constituídos pela junção de dois pares bimetálicos diferentes, como, por exemplo, cromo e alumínio. Essa junção é realizada a partir de solda na extremidade do par bimetálico, o qual, quando submetido a uma certa temperatura, gera uma tensão em milivolts proporcional à variação dessa temperatura.

Figura 12 – Tipos de termopares.



Fonte: Pakari (2020).

Com a junção de diferentes pares bimetálicos, cada termopar possui uma faixa de trabalho específica. Os mais comuns são:

- Termopar tipo J (Ferro e Constantan): 0 °C a 760 °C.
- Termopar tipo T (Cobre e Constantan): 0 °C a 400 °C.
- Termopar tipo K (Cromo e Alumínio): 0 °C a 1200 °C.
- Termopar tipo S (Platina e ródio): 0 °C a 1450 °C.

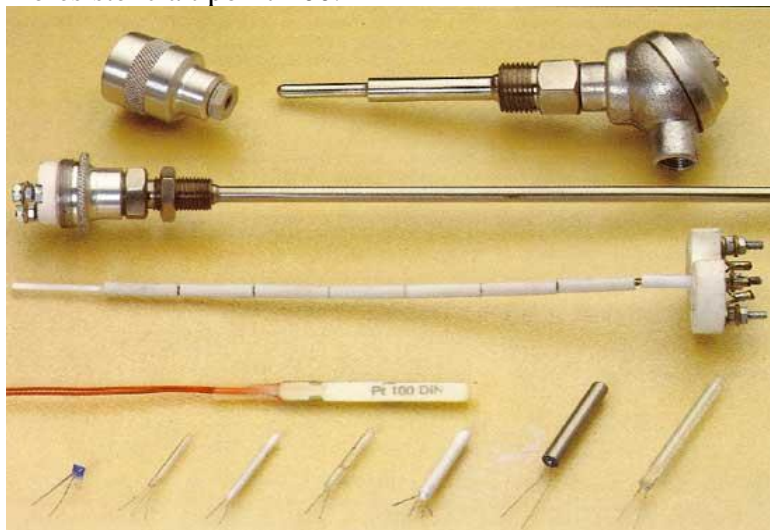
A escolha pelo tipo de termopar a ser aplicado em um processo depende de fatores, como: a temperatura de trabalho do processo e o tipo de material que o sensor deverá medir. A depender desses fatores, o termopar pode ser revestido de algum material, como bainha de porcelana, isolamento mineral ou mesmo em aço inox. Isso ocorre devido ao fato de que, para o sensor medir a temperatura, ele deve estar inserido no processo e isso influencia diretamente na vida útil do instrumento.

Termoresistências

Segundo Bega (2011), quase todos os materiais condutores elétricos apresentam uma dependência entre resistência e temperatura. Esse fato pode ser aplicado aos sensores. As termoresistências, também conhecidas como RTD (Detectores de Temperatura a Resistência), são sensores constituídos por uma liga de metais, normalmente platina, níquel e cobre. A junção de um ou mais desses componentes formam uma liga que, ao entrar em contato com calor, varia sua resistência elétrica.

O principal tipo de termoresistência empregado industrialmente é o Pt-100, ilustrado na Figura 13, cujo nome se padronizou por se obter o valor de 100Ω a uma temperatura de 0°C.

Figura 13 – Termoresistência tipo Pt-100.



Fonte: Silva Júnior (2015).

2.5.4 Sensores de vibração

Assim como as variáveis mencionadas acima, o monitoramento da vibração é um elemento de extrema importância para garantir a segurança e a integridade de um determinado equipamento. O sensor de vibração consegue identificar qualquer oscilação na máquina em que está instalado e converter essa oscilação em um sinal elétrico.

A principal aplicação dos sensores de vibração na indústria envolve equipamentos que produzem ou utilizam algum tipo de movimento em seu funcionamento, como motores, turbinas, exaustores, centrífugas, entre outros. A medição dessa variável permite identificar problemas antes que ocorram, mantendo a integridade da máquina e evitando que essa sofra algum dano com perdas financeiras expressivas (PATSKO, 2006).

Os sensores de vibração normalmente são construídos com materiais piezoelétricos (cristais de quartzo e fosfato de gálio), os quais geram uma tensão em milivolts quando submetidos a um esforço mecânico (PATSKO, 2006). Esse sinal em milivolts, dependendo da aplicação utilizada, é convertido por meio de um circuito eletrônico para um sinal 4 a 20 mA (miliamperes) e lido pelo controlador.

Figura 14 – Sensor de vibração VTV122 IFM.



Fonte: IFM Brasil (2020).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, detalha-se pormenorizadamente a metodologia empregada para a realização de cada etapa desta pesquisa. Para tanto, especifica-se: (i) a empresa na qual foi realizado o trabalho em questão, (ii) de que modo foram realizados os levantamentos de dados do objeto de estudo antes e depois dos ajustes feitos e (iii) uma análise do equipamento detalhando suas principais características.

3.1 Unidade de análise e observação

A Unidade Sulfúrico, em Araxá-MG, Figura 15, iniciou suas operações no ano de 2001, após a ampliação das unidades químicas da Mosaic Fertilizantes. Essa unidade tem como função: (i) produzir ácido sulfúrico para os processos de produção de fertilizantes e (ii) otimizar os custos, permitindo acréscimo de valor agregado ao produto final. Além de produzir o ácido sulfúrico utilizado pelas plantas químicas do complexo, a Unidade Sulfúrico consegue gerar cerca de 50% da energia elétrica consumida no complexo da Mosaic Fertilizantes, em Araxá-MG, com a utilização do sistema de cogeração de duas turbinas² instaladas na planta. A unidade foi projetada para produzir uma capacidade de 2100 t/d de ácido sulfúrico, sendo a produção anual de aproximadamente 755.002,5 toneladas. O ácido sulfúrico fabricado apresenta uma concentração de 98,3% a 98,8% (em peso), uma densidade de 1,834 t/m³ (40°C) e utiliza o enxofre como sua matéria-prima.

² Na planta do complexo da Mosaic Fertilizantes, em Araxá-MG, duas turbinas a vapor estão instaladas. Salienta-se que a análise que se realiza neste estudo será feita em apenas uma dessas turbinas.

Figura 15 – Unidade Sulfúrico.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

A Unidade Sulfúrico possui, em seu processo produtivo, duas turbinas que são utilizadas para a cogeração de energia elétrica. Essas duas turbinas instaladas na planta são turbinas a vapor de condensação por extração controlada, as quais possuem capacidade de produção energética de 23 MWh. Ressalta-se que as turbinas de condensação por extração controlada são empregadas em sistemas de cogeração que necessitam do vapor em seu processo (FERRAZ, 2008). A Unidade Sulfúrico utiliza-se desse tipo de turbina, pois faz uso do vapor aquecido tanto no processo de produção do ácido sulfúrico quanto nos processos das plantas químicas localizadas no complexo.

3.2 Técnica de coleta de dados

Barros e Lehfeld (2000) caracterizam o estudo de caso como sendo a coleta e o registro de informações acerca de algum caso, elaborando relatórios organizados e avaliados, proporcionando decisões e intervenções ao objeto escolhido para investigação. Este trabalho constitui, como método de pesquisa, um estudo de caso, nos moldes da definição apresentada, uma vez que, inseridos em um contexto específico e real, analisa-se os dados qualitativos, obtidos com a empresa Mosaic Fertilizantes de Araxá-MG, acerca do

funcionamento de uma de suas turbinas a vapor, objeto desta análise, da Unidade Sulfúrico, na cogeração de energia elétrica. Com os dados obtidos, intenta-se explicar, explorar, descrever ou melhorar um fenômeno em análise (YIN, 2001).

Cervo, Bervian e Silva (2007) compreendem a pesquisa ou a coleta documental a investigação de documentos, cujo propósito é descrever e comparar usos e costumes, tendências, diferenças, entre outras características, além de permitir estudar tanto a realidade presente como o passado. Um dos tipos de documentos analisados são os documentos particulares, que podem vir de fontes tais como instituições públicas ou privadas e, até mesmo, domicílios particulares (MARCONI; LAKATOS, 2015).

Em vista dessa definição, por se voltar à análise e à investigação de informações obtidas em relatórios técnicos restritos de uma empresa privada, os quais não receberam tratamentos científicos e analíticos precisos, lança-se mão, neste trabalho de pesquisa documental, a fim de proporcionar uma melhor compreensão do processo em análise, bem como verificar se os ajustes propostos melhoraram a eficiência do equipamento. No ano de 2018, foram realizados alguns ajustes na turbina a vapor objeto desta análise. Coletou-se, portanto, informações documentais acerca desses ajustes, de modo a dar a eles tratamento científico.

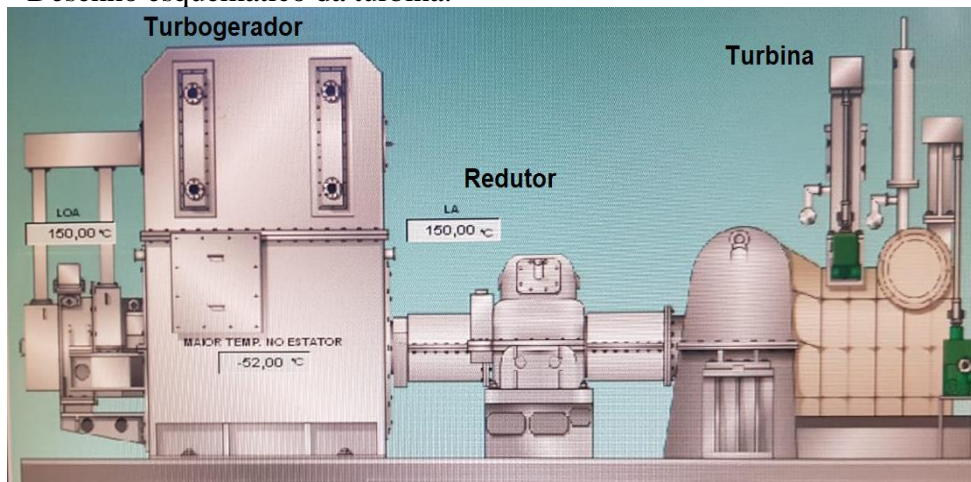
Logo, com este estudo, realizou-se a pesquisa documental nos históricos da empresa, de forma a analisar documentos, relatórios técnicos e informações sobre a turbina objeto deste estudo. Além disso, pesquisou-se também informações em arquivos existentes em *softwares* utilizados pela empresa, de modo a obter dados referentes à produção energética da turbina a vapor. Para tal, recorreu-se a dados históricos operacionais do equipamento.

Ressalta-se que a fragmentação do intervalo de análise escolhida compreende ao ano de 2018 e um ano depois de 2018, momento em que uma série de ajustes foram realizados no equipamento. Esses dados não se encontram estruturados de forma a permitir análises aprofundadas acerca das supostas melhorias, por isso a importância deste estudo.

3.3 Análise do Equipamento

O equipamento objeto de estudo deste trabalho é uma turbina a vapor de condensação por extração controlada, fabricada pela empresa NG Metalúrgica. O sistema é composto por: turbina, redutor e turbogerador. A representação esquemática da turbina pode ser visualizada na Figura 16, na qual consta o desenho esquemático da turbina, e na Figura 17, por meio de foto real tirada pelo pesquisador.

Figura 16 – Desenho esquemático da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – Foto da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

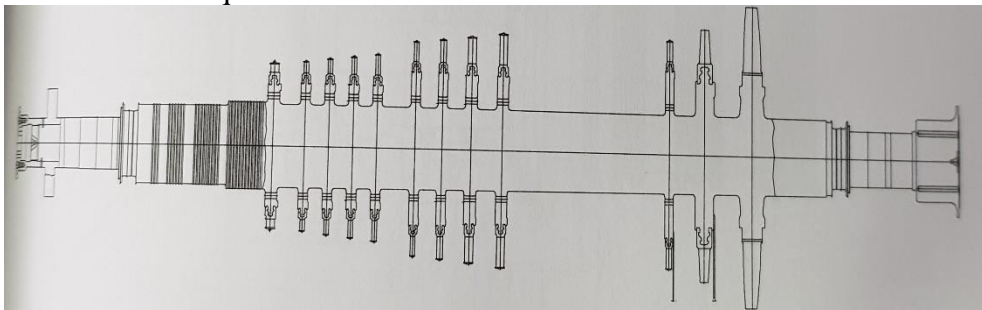
A fim de melhor descrever esse equipamento, neste tópico especifica-se detalhadamente cada componente principal, quais sejam: o rotor e a carcaça, as válvulas que controlam o vapor, além de toda a parte de controle e de instrumentação.

3.3.1 Rotor e Carcaça

Ilustra-se, na Figura 18, o rotor, o qual representa a parte móvel da turbina. É por meio dele que o vapor irá fluir e transformar sua energia cinética em trabalho mecânico. A fabricação desse componente estrutural é feita em aço liga forjado, o que lhe confere alta resistência à corrosão, sendo usinado em uma única peça. Além disso, ele é composto por palhetas, que são lâminas aerodinamicamente fabricadas e usinadas junto ao rotor. Através

delas, o vapor flui, o que confere o movimento de rotação desse componente. A Figura 19 mostra a foto real do rotor.

Figura 18 – Desenho esquemático do rotor.



Fonte: Manual de Instruções Turbina H3/800 S.

Figura 19 – Rotor da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As carcaças, Figuras 20 e 21, são as bases inferior e superior, respectivamente, que sustentam o rotor. Além disso, são fabricadas para acoplarem a câmara das válvulas e os instrumentos de medição, como sensores de temperatura e vibração.

Figura 20 – Carcaça inferior da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Carcaça superior da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

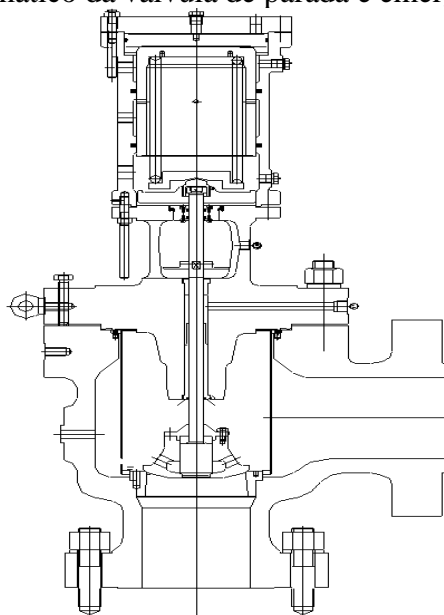
3.3.2 Válvula combinada de parada e emergência

O vapor, quando é admitido na turbina, passa primeiramente por essa válvula, a qual possui um filtro de vapor cuja finalidade é proteger a turbina contra qualquer material estranho oriundo da tubulação de vapor de admissão. Essa válvula tem por objetivo proporcionar mais segurança à operação da turbina. Ela é operada hidráulicamente e permite

a parada normal ou o fechamento rápido, em caso de emergência, durante a operação da turbina.

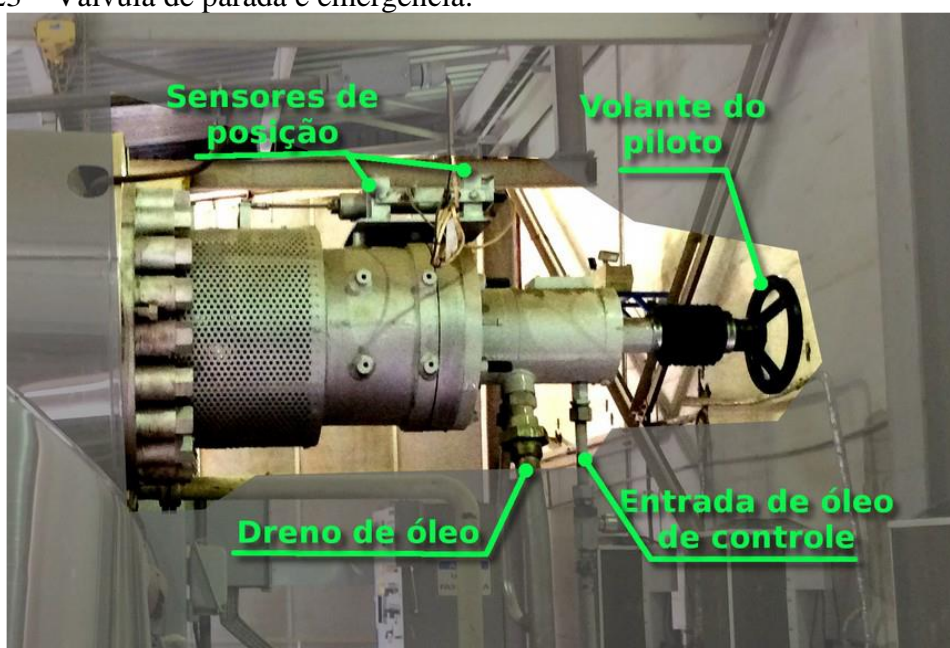
A Figura 22 apresenta o desenho esquemático dessa válvula e a Figura 23 exibe a válvula real instalada no corpo da turbina.

Figura 22 – Desenho esquemático da válvula de parada e emergência.



Fonte: Manual de Instruções Turbina H3/800 S.

Figura 23 – Válvula de parada e emergência.

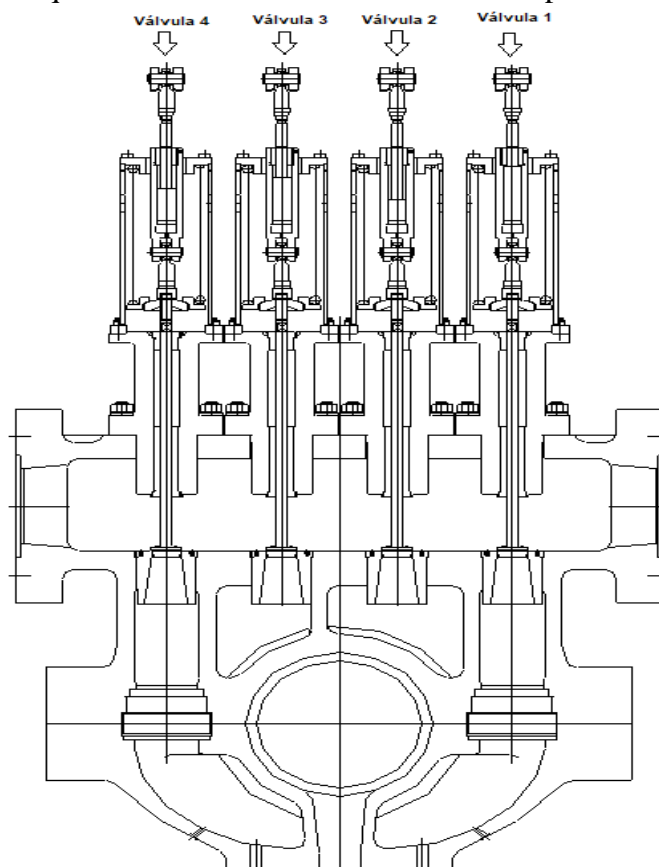


Fonte: Dados da empresa.

3.3.3 Válvula de controle de vapor

Após a passagem do vapor pela válvula de parada e emergência, ele passa pelas válvulas de controle, que compreendem um conjunto de quatro válvulas responsáveis por manter a pressão do vapor na carcaça de alta pressão da turbina. Esse conjunto de válvulas opera por um sistema eletromecânico, através de um atuador eletro-hidráulico. O controle dessas válvulas de admissão de vapor é realizado por meio do regulador de velocidades, denominado “Woodward 505E”, que é especificado em outro tópico. A Figura 24 expõe o desenho esquemático das válvulas de controle de vapor.

Figura 24 – Desenho esquemático da válvula de controle de vapor.



Fonte: Manual de Instruções Turbina H3/800 S.

Com a turbina em operação, as válvulas obedecem a uma sequência de abertura, de acordo com o projeto, respeitando a carga da turbina, sendo que a válvula 1 abre primeiro, depois a válvula 4, na sequência a válvula 3 e, por último, válvula 2. A Figura 25 apresenta a imagem real da válvula de controle de vapor.

Figura 25 – Válvula de controle de vapor.



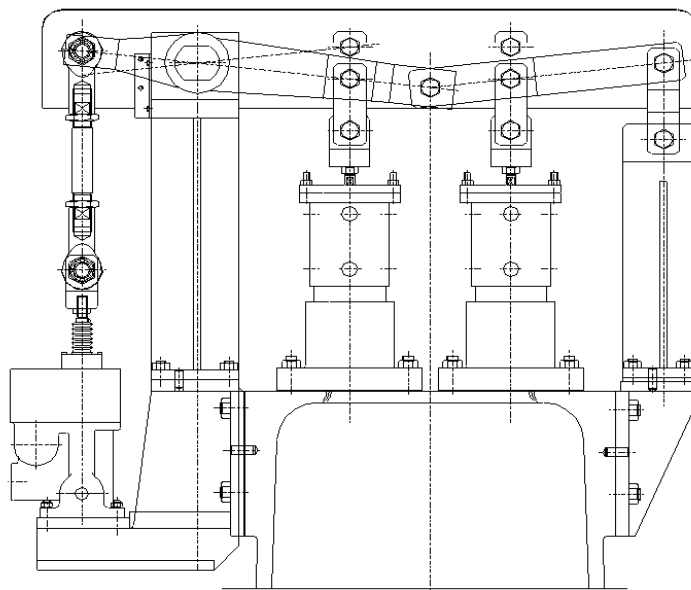
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.4 Válvula de extração controlada

O equipamento, objeto de estudo neste trabalho, como já mencionado, é uma turbina de condensação por extração controlada. Esse equipamento possui, em sua construção, uma válvula cujo objetivo é extrair vapor em um determinado estágio em que a turbina está operando. O vapor extraído da turbina, a exatamente $7,5 \text{ kgf/cm}^2$, é utilizado no processo, tanto na planta Sulfúrico, como em algumas unidades da área de produção de fertilizantes.

A válvula de extração, no projeto dessa turbina, está acoplada ao nono estágio dos onze que o equipamento possui. É controlada pelo regulador de velocidades “Woodward 505E”, assim como as válvulas de controle de vapor. As Figuras 26 e 27 ilustram, respectivamente, o desenho esquemático e a foto real da válvula de extração.

Figura 26 – Desenho esquemático da válvula de extração.



Fonte: Manual de Instruções Turbina H3/800 S.

Figura 27 – Válvula de extração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.5 Controle de velocidade

O equipamento responsável pelo controle da velocidade da turbina é o “Woodward 505E”, o qual é exposto na Figura 28. Através dele, a velocidade da turbina é regulada a um valor de 6500 rpm. Caso a carga da turbina sofra alguma variação, sua velocidade também

irá alterar. Quando isso ocorre, um sinal é enviado ao atuador da válvula de controle de vapor para reduzir ou aumentar a admissão de vapor na turbina, mantendo a velocidade no valor pré-fixado.

Figura 28 – Controlador de velocidade “Woodward 505E”.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para que seja possível gerar energia para a rede a 60 Hz, o eixo da turbina é conectado a um redutor de velocidades, apresentado na Figura 29. Esse redutor tem a função de restringir a velocidade de 6500 rpm para 1800 rpm. Do redutor, o eixo é interligado no eixo do turbo gerador, a partir do qual passa a gerar energia.

Figura 29 – Redutor da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.6 Instrumentação da turbina

Para se ter um controle efetivo e segurança de funcionamento da turbina, é necessário conhecer diversas variáveis. Esse equipamento dispõe de uma série de instrumentos, como sensores de temperatura, sensores de vibração e pressão, pressostatos, manômetros, além do painel de controle no qual estão instalados os módulos de controle de velocidades, monitor de vibração e a IHM (Interface Homem-Máquina), por meio da qual é possível verificar todas as variáveis e efetuar a operação da turbina.

3.3.6.1 Sensores Temperatura

É um tipo de sensor imprescindível para a segurança da turbina. Através deles, representados na Figura 30, é possível monitorar vários pontos essenciais do equipamento, como: temperatura dos mancais da turbina, temperatura dos mancais do redutor, temperatura do vapor de entrada, entre outros. No equipamento, objeto desta análise, há um total de 15 sensores, os quais têm por função garantir o funcionamento adequado e manter a sua integridade operacional, caso ocorra alguma falha de superaquecimento em algum ponto.

Figura 30 – Sensor de temperatura da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nessa turbina, são utilizados dois tipos de modelos de sensores de temperatura, a saber: PT100 (Termoresistências) e termopar. Os termopares são empregados para monitorar a temperatura dos vapores de admissão, extração e escape. Já os PT100's são utilizados para monitorar as temperaturas dos mancais da turbina, do redutor e do turbogerador.

Externamente, as aparências desses sensores não se diferenciam muito; suas diferenças estão no princípio de funcionamento e em sua construção, especificados no referencial teórico deste trabalho.

3.3.6.2 Sensores de pressão

Assim como os sensores de temperatura, os sensores de pressão, ilustrados na Figura 31, exercem papel fundamental no controle e na segurança da turbina. A pressão de entrada do vapor na turbina é por volta de 42 kgf/cm². Essa grandeza precisa ser monitorada com bastante precisão, de modo a garantir a integridade do equipamento. Assim como o monitoramento da pressão de entrada, os sensores de pressão se dispõem em vários outros pontos da turbina, como no vapor de extração, no vapor de escape, no vapor do primeiro estágio, entre outros, totalizando seis sensores.

Figura 31 – Transmissor de pressão turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além desses, a turbina possui também pressostatos (cf. Figura 32), que são instrumentos de segurança cuja finalidade é gerar um alarme ou, até mesmo, desligar o equipamento, caso o valor de pressão exceda os valores pré-estabelecidos de operação. Essa proteção é realizada através da lógica de programação da turbina, inserindo na linha código um intertravamento do qual impede o equipamento de rodar.

Figura 32 – Pressostato da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os manômetros são instrumentos utilizados para monitorar a pressão. Esses são dispostos em pontos específicos da turbina, totalizando 25 manômetros instalados no equipamento. Confira, na Figura 33, a imagem de um dos manômetros da turbina.

Figura 33 – Manômetro da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.6.3 Sensores de vibração

Outro monitoramento essencial à turbina é a análise de vibração. Por ser um equipamento bastante robusto e, ao mesmo tempo, requer muito cuidado em sua operação, os sensores de vibração, observados na Figura 34, são dispositivos colocados nos mancais da turbina, no redutor e no turbogerador, de modo a detectar as mínimas variações de vibrações em seus mancais.

Figura 34 – Sensor de vibração da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.6.4 Painel de controle da turbina

A turbina requer diversos instrumentos a fim de realizar o controle e o monitoramento de variáveis de processo enquanto está operando. Há, portanto, um painel instalado (ilustrado na Figura 35), ao lado do equipamento, com alguns dispositivos cuja função é controlar a turbina.

O governador de velocidade “Woodward 505E” monitora a maioria dos equipamentos inerentes ao controle de velocidade da turbina, como as válvulas de admissão e extração de vapor, além de realizar a rampa de aceleração e desaceleração. O CLP (Controlador Lógico Programável) é o equipamento responsável pela aquisição, leitura e resposta dos valores lidos dos instrumentos instalados na turbina, além de deter a lógica de funcionamento do equipamento, os intertravamentos, ou seja, a quantidade de passos ou laços, a fim de proteger a turbina.

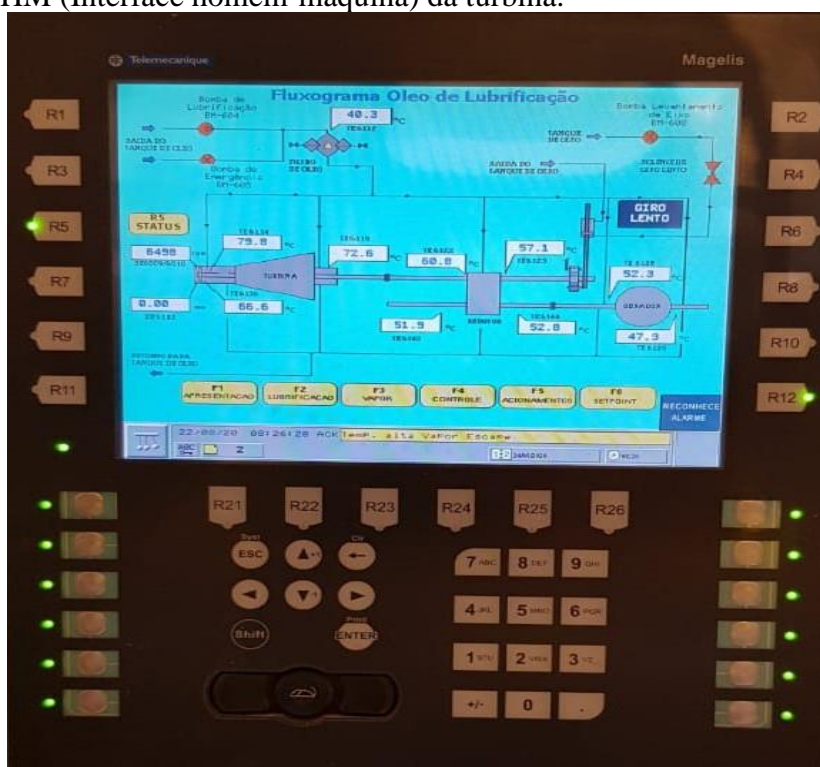
Figura 35 – Painel de controle da turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, a IHM (Interface homem-máquina), Figura 36, é o dispositivo no qual todas as telas para se controlar a turbina estão nele, além de toda a indicação das variáveis de controle. É através da IHM que o operador consegue visualizar os sinais das variáveis, ligar ou desligar, monitorar e acompanhar registros de alarmes que possam acontecer no equipamento.

Figura 36 – IHM (Interface homem-máquina) da turbina.



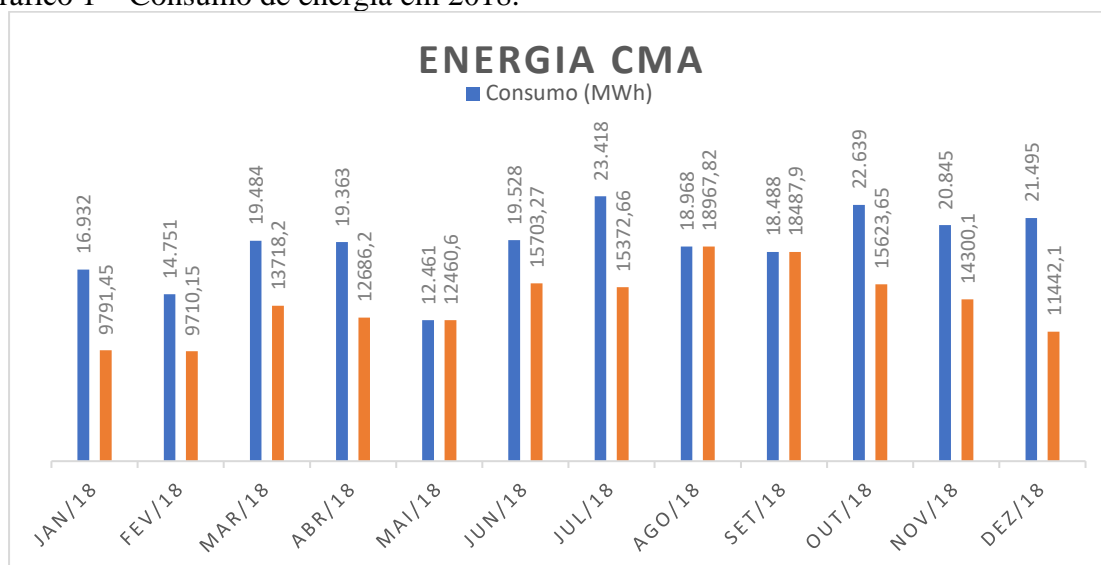
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Análise da produção energética

As turbinas da Unidade Sulfúrico, do Complexo Minerquímico da Mosaic Fertilizantes, em Araxá-MG, quando entraram em operação, em 2001, possuíam capacidade de produção energética de 23MWh. Com o passar dos anos, a vida útil do equipamento diminuiu e, com isso, também sua eficiência. Sabendo-se disso, no Gráfico 1, apresenta-se a comparação entre o consumo de energia do Complexo e o que foi comprado da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais S.A) no ano de 2018. Conforme se observa, em alguns meses, nota-se que o que foi comprado é menor do que o consumido. Esse fato se deve à produção de energia gerada pelas turbinas, o que permitiu uma maior geração energética, diminuindo, com isso, os gastos com a compra de energia que faltava.

Gráfico 1 – Consumo de energia em 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

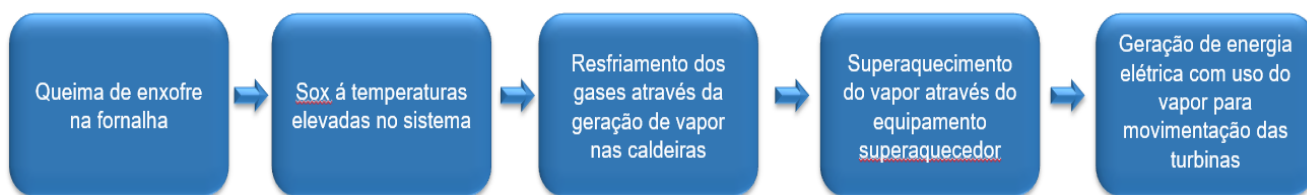
Analisando o Gráfico 1, identifica-se um problema: apesar de se ter produzido energia elétrica na unidade, ainda assim foi necessário comprar energia da CEMIG para atender às demandas de consumo da planta. Dito isto, a empresa buscou, junto aos seus colaboradores, aumentar a eficiência de uma das turbinas a vapor responsável pela geração de energia elétrica.

4.2 Análise da causa raiz

A análise de causas e efeitos, por meio da qual foram estratificadas e encontradas algumas das causas que reduziam a eficiência do equipamento foi realizada em conjunto com membros das equipes de Operação, de Manutenção e de Processo. Essa equipe interdisciplinar discutiu e analisou os problemas encontrados no equipamento, de modo que, para cada problema identificado, procurou-se encontrar a causa para ele e, assim, subsequentemente, até alcançar a causa raiz. Após esse estudo interdisciplinar, foi estruturado os fluxogramas abaixo para avaliar e definir quais problemas resolver.

Primeiramente, para conseguir entender o problema, foi necessário compreender o fluxo do processo de produção do ácido sulfúrico e a etapa em que a turbina se encontra nesse processo. A fim de melhor exemplificar essas etapas, elaborou-se o fluxograma abaixo:

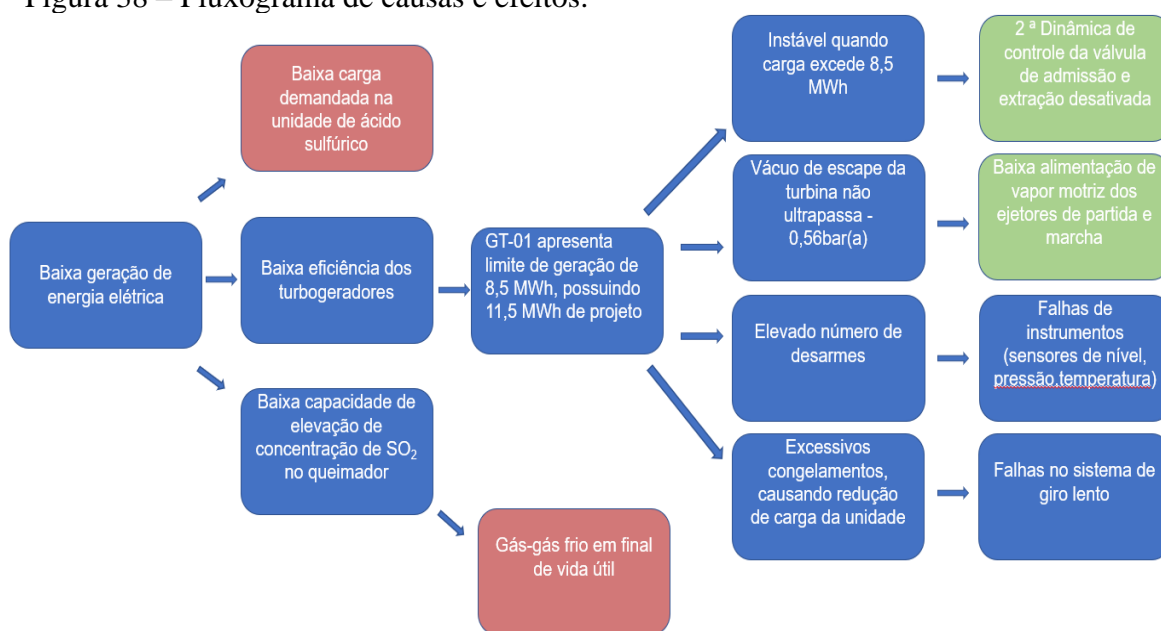
Figura 37 – Fluxograma do processo de produção de vapor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após identificar o fluxo de processo, foram estratificados os problemas, com o objetivo de se chegar à causa raiz e determinar se seria possível realizar alguma ação corretiva, com o intuito de sanar o impasse e alcançar o objetivo de aumentar a eficiência da turbina. Partindo do problema inicial, “baixa geração de energia elétrica”, foram identificados os problemas subsequentes, até se chegar às causas raízes de cada um, conforme mostra o fluxograma abaixo:

Figura 38 – Fluxograma de causas e efeitos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando o fluxograma exposto na Figura 38, as setas apontadas para cada retângulo representam uma causa para cada problema identificado. Os retângulos em vermelho são causas que não podem ser mais estratificadas. Os demais foram se decompondo até se chegar a duas causas raízes em verde. Os ajustes e as análises do equipamento foram realizados tendo em vista as duas causas encontradas, pois foram as que tiveram uma maior representatividade no problema de baixa eficiência do equipamento. As outras, identificadas como “Falhas de instrumentos” e “Falhas no sistema de giro lento”, tiveram pouco impacto no contexto geral, por isso não vão entrar na análise deste estudo.

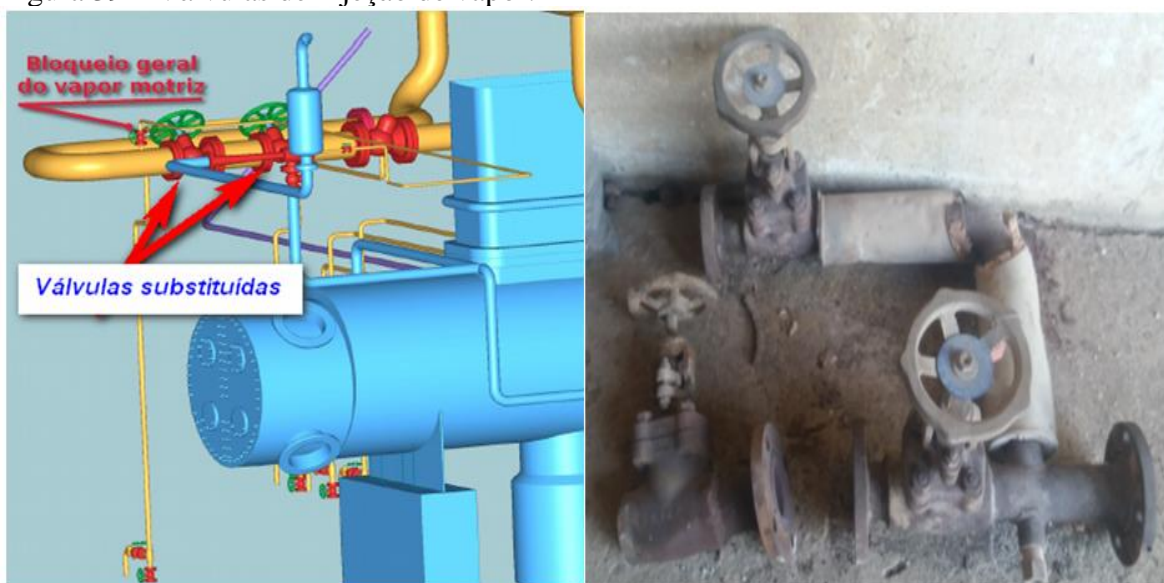
4.3 Ajustes no equipamento

Com o intuito de aumentar a eficiência energética em uma das turbinas, foram realizados ajustes no equipamento, tendo em vista o estudo resumido nos fluxogramas anteriores. A primeira causa constatada foi o ajuste do controle da válvula de admissão e de extração da turbina, denominada dinâmicas de controle. A turbina possui dois tipos de controle quando está em operação: 1ª dinâmica e 2ª dinâmica. Esses controles existem para regular o comportamento das válvulas de admissão e de extração, de modo que, após a partida do equipamento, em determinada velocidade de rotação, as dinâmicas mudam, para evitar oscilações no sistema.

Em função disso, foi ajustado o controle da 2ª dinâmica do controlador de velocidade do equipamento. Esse ajuste foi realizado por meio de um parâmetro no controlador de velocidades “Woodward 505E”. Nele, essas dinâmicas são descritas como dinâmica *offline* e dinâmica *online*, que correspondem às dinâmicas 1 e 2 respectivamente. A primeira dinâmica funciona controlando a velocidade da turbina através de ajustes do PID (Proporcional Integral Derivativo) da velocidade. Quando a turbina alcança o valor pré-ajustado de velocidade, ela entra em sincronismo com a rede, ou seja, ela passa a gerar energia. Quando isso ocorre, o controlador “Woodward 505E” altera para a segunda dinâmica, a qual passa a controlar o monitoramento da carga, ou seja, o valor pré-estabelecido de energia que será produzida.

Observou-se, também, na análise efetuada no equipamento, que algumas válvulas bloqueavam a passagem de vapor para o condensador da turbina, por estarem bastante desgastadas devido às intempéries do tempo. Essas válvulas são utilizadas nos ejetores do condensador da turbina para melhorar a geração do vácuo do equipamento. Após a constatação de que a abertura e o fechamento das válvulas tinham funcionamento comprometido, verificou-se que havia um problema mecânico nelas. Ao desmontá-las, notou-se que estavam desgastadas e não abriam completamente. Por estarem parcialmente bloqueadas, não ocorria a injeção de vapor na turbina de forma correta, prejudicando sua eficiência. Por isso, decidiu-se pela troca dessas válvulas, eliminando o gargalo de injeção de vapor para a geração de vácuo na turbina. A Figura 39 expõe as válvulas substituídas.

Figura 39 – Válvulas de injeção de vapor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Discussão sobre os resultados obtidos

4.4.1 Análise do rendimento isentrópico da turbina

Ao analisar as condições operacionais da turbina, observou-se duas condições:

- a) A primeira refere-se aos dados das constantes operacionais descritas nos documentos (DataSheet) do fabricante, nos quais é possível analisar todos os valores nominais de operação do equipamento, como, por exemplo, a rotação nominal da turbina e do gerador, a potência, a pressão e a temperatura de admissão e o escape, entre outros.
- b) A segunda concerne-se aos dados retirados da operação coletados após as melhorias do equipamento.

A fim de determinar o rendimento do equipamento, foram coletados os dados e analisados conforme as condições operacionais descritas anteriormente. O cálculo do rendimento foi realizado por meio do conceito de eficiência isentrópica. De acordo com Çengel e Boles (2012), o processo isentrópico é definido como um processo em que a entropia permanece constante, ou seja, não há transferência de calor ou matéria. Nessa medida, a eficiência isentrópica idealiza o processo ideal daquele dispositivo, por isso, quanto mais próximo o processo real estiver do isentrópico, melhor será o desempenho do equipamento (ÇENGEL; BOLES, 2012).

O equivalente termodinâmico do trabalho mecânico é o calor. Portanto, calor é energia. Considerado isso, para determinar a eficiência isentrópica da turbina objeto deste estudo, foi efetuada a divisão do trabalho resultante real pelo trabalho resultante que seria alcançado se o processo entre o estado, a entrada e a pressão de saída fossem isentrópicas, tal qual descrito na Equação 2:

$$\eta_T = \frac{w_r}{w_s}$$

$$\eta_T = \text{Rendimento}$$

$$w_r = \text{Trabalho real da turbina}$$

$$w_s = \text{Trabalho isentrópico da turbina}$$

A Equação acima pode ser escrita adotando o trabalho como sendo os valores de entalpia de entrada e saída do processo. Veja a Equação 3:

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_{2s}}$$

Onde:

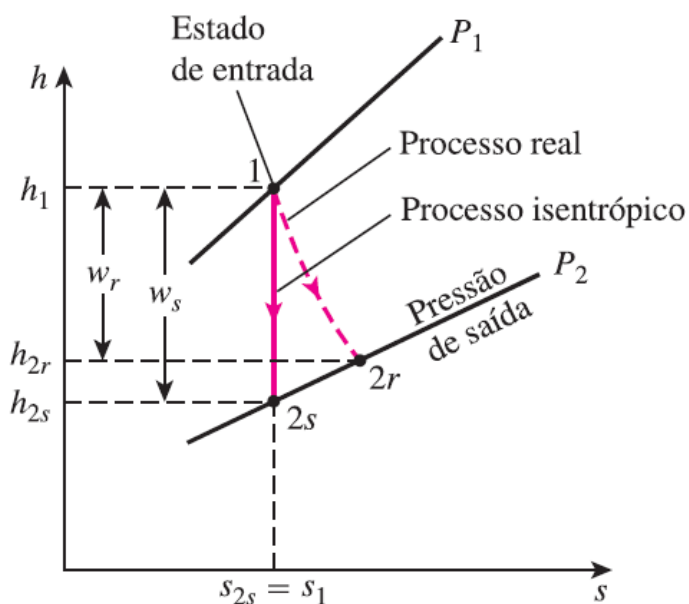
h_1 = entalpia de entrada

h_{2r} = entalpia saída processo real

h_{2s} = entalpia saída processo isentrópico

O diagrama, ilustrado na Figura 40, elucidou o processo real e o processo isentrópico ou ideal do equipamento:

Figura 40 – Diagrama h-s dos processos real e isentrópico de uma turbina adiabática.



Fonte: Çengel e Boles (2012).

Para determinar o rendimento isentrópico da turbina, os dados necessários das constantes do equipamento, coletadas de seus documentos, foram considerados. As constantes foram: pressões de admissão e escape, as temperaturas de admissão e escape, além da potência gerada pela turbina, a saber:

$$P_{\text{admissão}} = 4,3 \text{ MPA}$$

$$P_{\text{escape}} = 11 \text{ KPA}$$

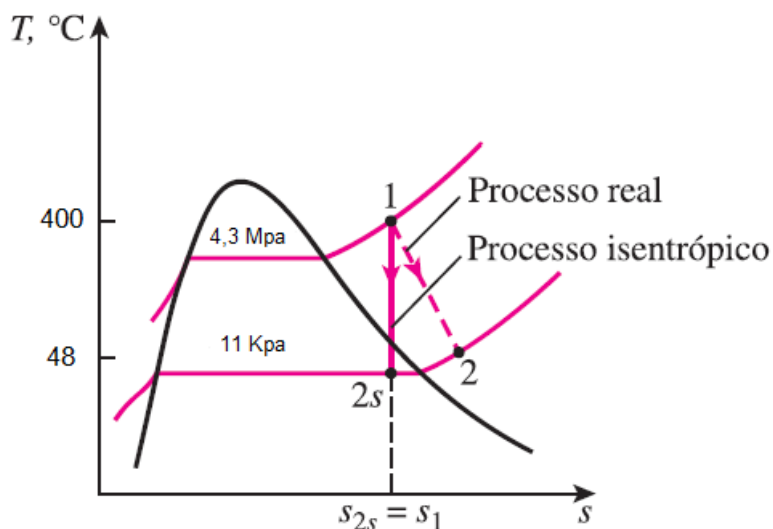
$$T_{\text{admissão}} = 400^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{escape}} = 48^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{nominal}} = 11 \text{ KW}$$

Considerando que o vapor da água escoa em regime permanente, as variações de energias cinéticas e potência são desprezíveis, portanto, primeiramente, determina-se as entalpias nos estados de entrada e saída da turbina, conforme demonstrado na Figura 41:

Figura 41 – Diagrama T-s dos processos isentrópico e real.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Estado 1: consultando o *software* CATT 3 (*Computer-Aided Thermodynamic Tables 3*) para verificar os valores de entalpia para a entrada do processo, obteve-se:

$$P_1 = 4,3 \text{ MPA}$$

$$T_1 = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 3208 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$s_1 = 6,7328 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \cdot \text{K}$$

- Estado 2r: consultando o *software* CATT 3 (*Computer-Aided Thermodynamic Tables 3*) para verificar os valores de entalpia para a saída do processo, obteve-se:

$$P_{2r} = 11 \text{ KPA}$$

$$T_{2r} = 48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_{2r} = 2589 \text{ Kj/Kg}$$

Ao final do processo isentrópico, há uma mistura líquido-vapor saturado, uma vez que $s_1 < s_{2s} < s_v$. Portanto, encontra-se o título no Estado 2s, considerando que s_l é a entropia da água saturada e s_v a entropia do vapor saturado.

$$s_{2s} = s_1$$

$$s_1 = 0,6737 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \cdot \text{K}$$

$$s_v = 8,117 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \cdot \text{K}$$

$$X_{2s} = \frac{(s_{2s} - s_1)}{s_{lv}} = \frac{6,7328 - 0,6737}{8,117 - 0,6737} = 0,814$$

e

$$h_{2s} = h_1 + x_{2s}h_{lv} = 199,6 + 0,814(2388,14) = 2143,55 \text{ Kj/Kg}$$

Substituindo os valores de entalpia, obteve-se a eficiência isentrópica da turbina:

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_{2s}} = \frac{3208 - 2589}{3208 - 2143,55} = 0,581 = 58,1\%$$

A vazão mássica de vapor de água, através da turbina, é determinada a partir do balanço de energia para dispositivos com escoamento em regime permanente:

$$11,5 \text{ MW} \left(\frac{1000 \text{ Kj/s}}{1 \text{ MW}} \right) = \dot{m}(3208 - 2589) \text{ Kj/Kg} = 18,58 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 66,88 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

Os valores encontrados do rendimento isentrópico e da vazão mássica da turbina foram, respectivamente, 58,1% e 66,88 T/h. Esse resultado refere-se aos dados nominais de operação do equipamento.

Extraíndo os valores de operações reais do equipamento, os cálculos foram refeitos a fim de determinar o rendimento e a vazão real da turbina em operação. Para tanto, foram coletados os valores em um dia específico em que a turbina se encontrava em funcionamento:

$$P_{\text{admissão}} = 4,19 \text{ MPA}$$

$$P_{\text{escape}} = 11,77 \text{ KPA}$$

$$T_{\text{admissão}} = 415,23^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{escape}} = 48,89^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{nominal}} = 6,23 \text{ KW}$$

Obtendo todos os valores de entalpias e entropias necessários, têm-se:

$$h_1 = 3246 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$s_1 = 6,921 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \cdot \text{K}$$

$$h_{2r} = 2590 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$s_{2s} = s_1$$

$$s_l = 0,6912 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \cdot \text{K}$$

$$s_v = 8,093 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}} \cdot \text{K}$$

$$h_l = 205,3 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}}$$

$$X_{2s} = \frac{(s_{2s} - s_1)}{s_{lv}} = \frac{6,921 - 0,6912}{8,093 - 0,6912} = 0,842$$

$$h_{2s} = h_1 + x_{2s} h_{lv} = 205,3 + 0,842(2359,5) = 2192 \text{ Kj/Kg}$$

Substituindo os valores de entalpia, obteve-se a eficiência isentrópica da turbina:

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_{2s}} = \frac{3246 - 2590}{3246 - 2192} = 0,622 = 62,2\%$$

Determinando a vazão mássica, tem-se:

$$6,23 \text{ MW} \left(\frac{1000 \text{ Kj/s}}{1 \text{ MW}} \right) = \dot{m}(3246 - 2590) \text{ Kj/Kg} = 9,5 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 34,19 \frac{\text{T}}{\text{h}}$$

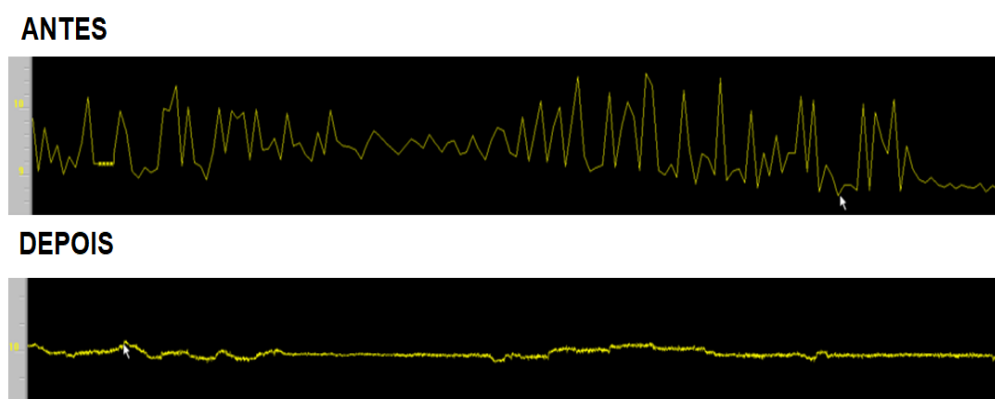
As manobras produziram como efeito aumentar a eficiência térmica isentrópica da turbina de 58,1% para 62,2%. Esses dados traduzem a redução do consumo de vapor por hora. Extrapolando, pode-se, em uma condição de potência de 11,5 MW, estimar um

consumo real de 63,11 T/h, isto é, uma redução de 5,97% de consumo de vapor. Esses cálculos foram realizados considerando uma turbina sem a extração de vapor diferente da turbina estudada neste trabalho da qual possui extração de vapor.

4.4.2 Análise do consumo de energia

A Figura 42 apresenta um gráfico comparativo da forma de geração de energia elétrica em MW do período de geração de um dia específico antes e após os ajustes nas válvulas de admissão e de extração. Ao se analisar a Figura 42, percebe-se que, antes de efetuar a alteração, a geração de energia oscilava bastante e, após o ajuste, a geração se estabeleceu e se manteve bastante estável.

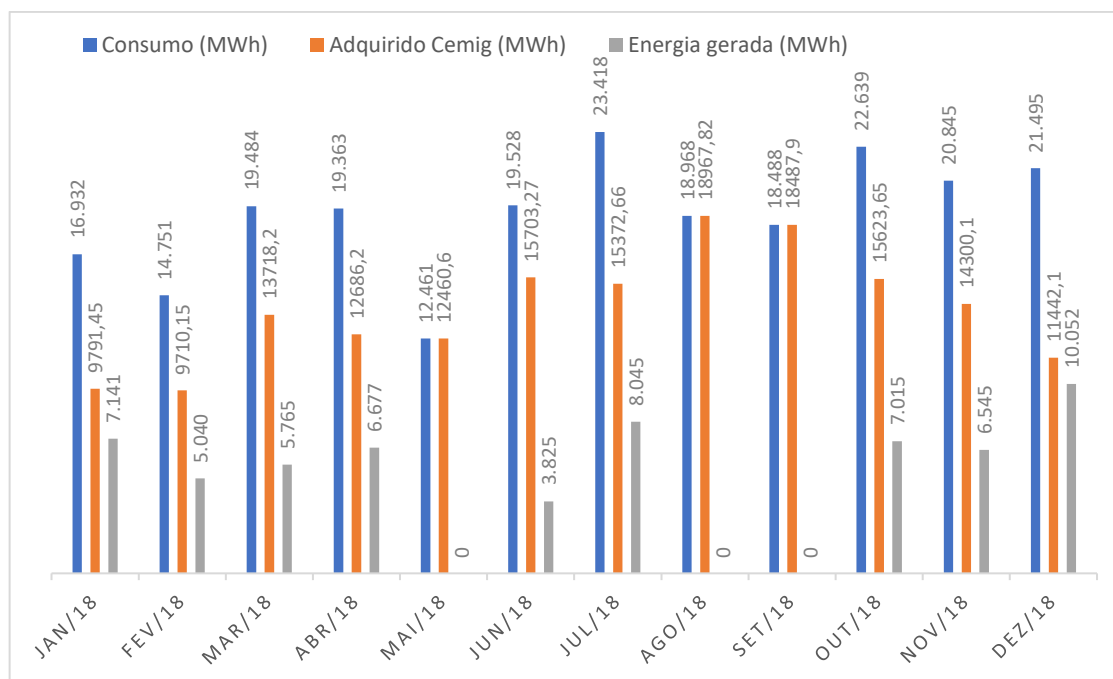
Figura 42 – Geração de energia elétrica pela turbina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A quantidade de energia gerada, no decorrer do ano de 2018, por meio das turbinas instaladas na unidade, foi comparada ao consumo total de energia da planta. Observe essa comparação ilustrada no Gráfico 2:

Gráfico 2 – Energia gerada em 2018.

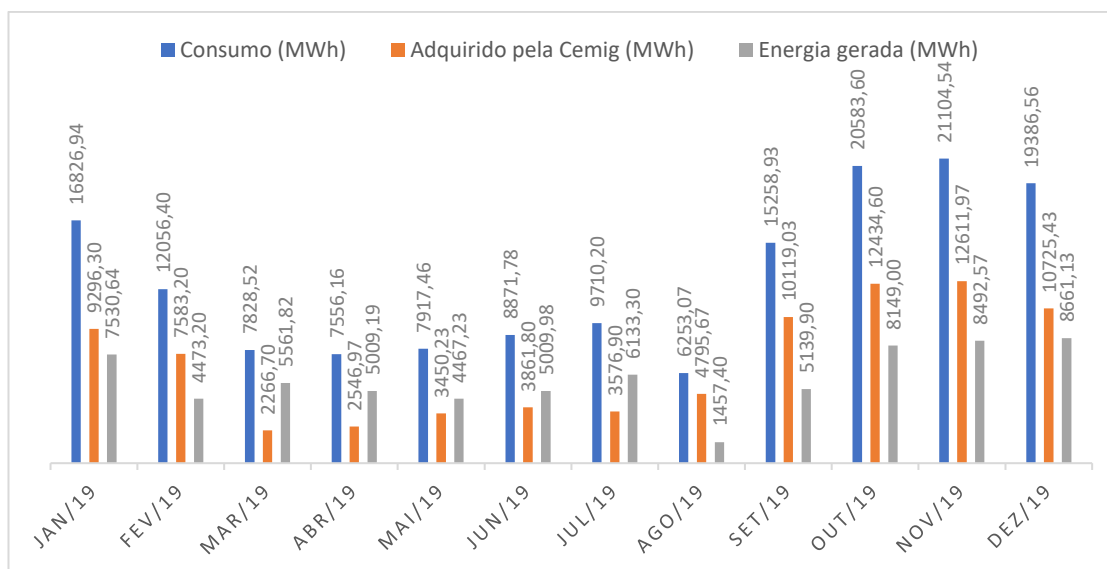


Fonte: Elaborado pelo autor.

A somatória da produção de energia, no decorrer do ano de 2018, contabilizou 60,1MWh. Esses valores são relativos à produção energética antes dos ajustes realizados em uma das turbinas da Unidade Sulfúrico.

Para comparar a geração de energia em 2018, antes dos ajustes, e no decorrer do ano de 2019, foram coletados dados e analisados da mesma maneira que o ano 2018, gerando o Gráfico 3:

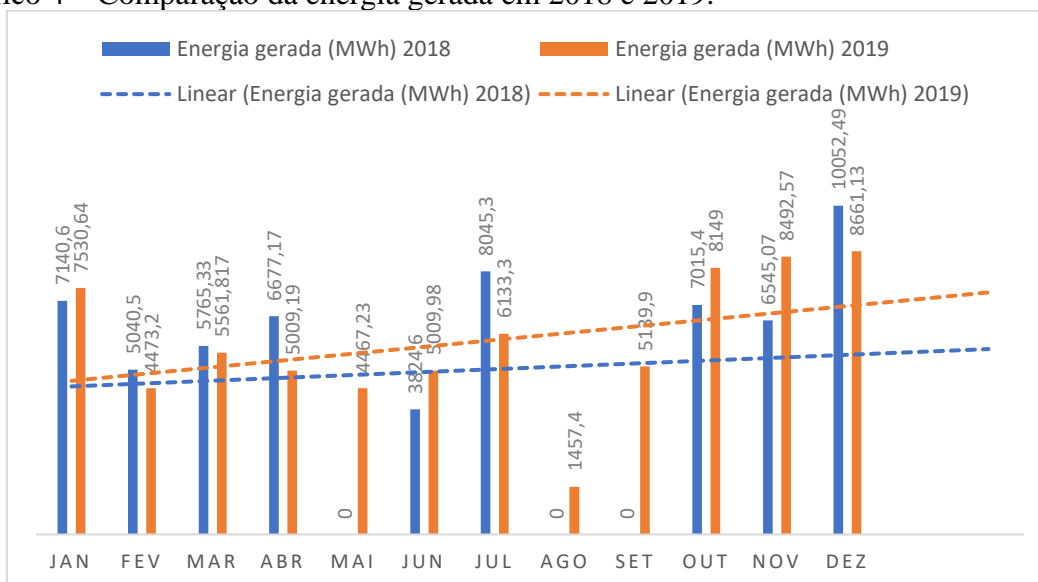
Gráfico 3 – Energia gerada em 2019.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 4 ilustra a comparação da geração de energia entre os anos de 2018 e 2019. Como pode ser observado, a linha de tendência para o ano de 2019 está maior do que para o ano de 2018.

Gráfico 4 – Comparação da energia gerada em 2018 e 2019.

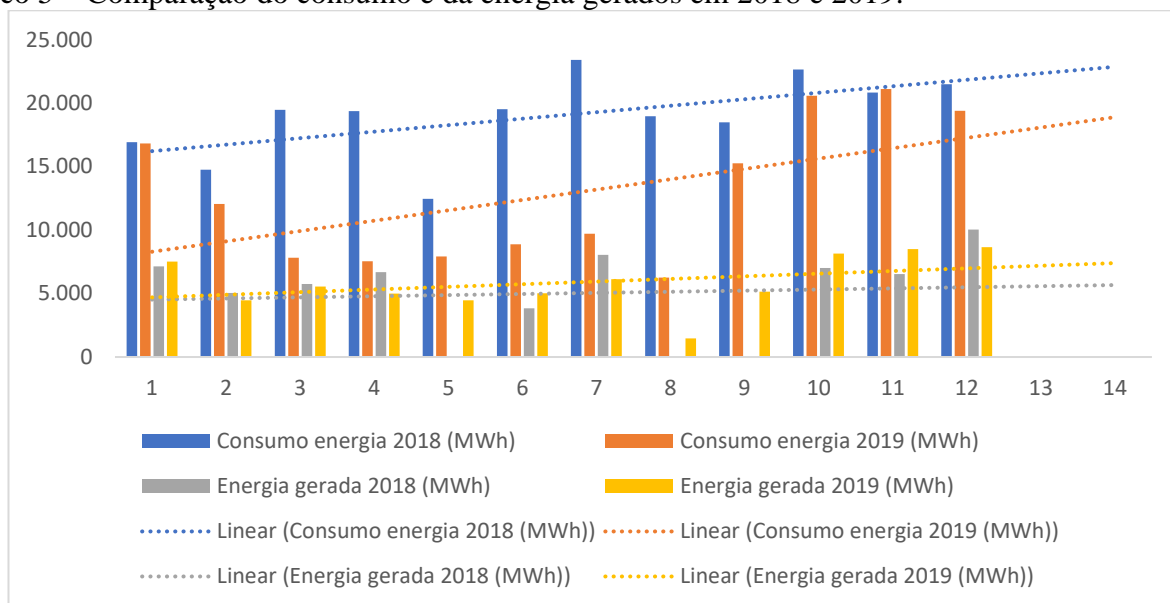


Fonte: Elaborado pelo autor.

A somatória da produção de energia em 2019 foi de 70,09MWh. Esse valor, em comparação com a produção no ano de 2018, compreende um aumento de 14,25% de produção de energia. O consumo total de energia em 2018 foi de 228370,56MWh e em 2019 contabilizou 153354,16MWh. A diferença representa uma diminuição de 32,8% do consumo de energia para esse último ano.

A fim de comparar o consumo de energia e a energia gerada nos dois anos, foi elaborado o Gráfico 5 :

Gráfico 5 – Comparação do consumo e da energia gerados em 2018 e 2019.



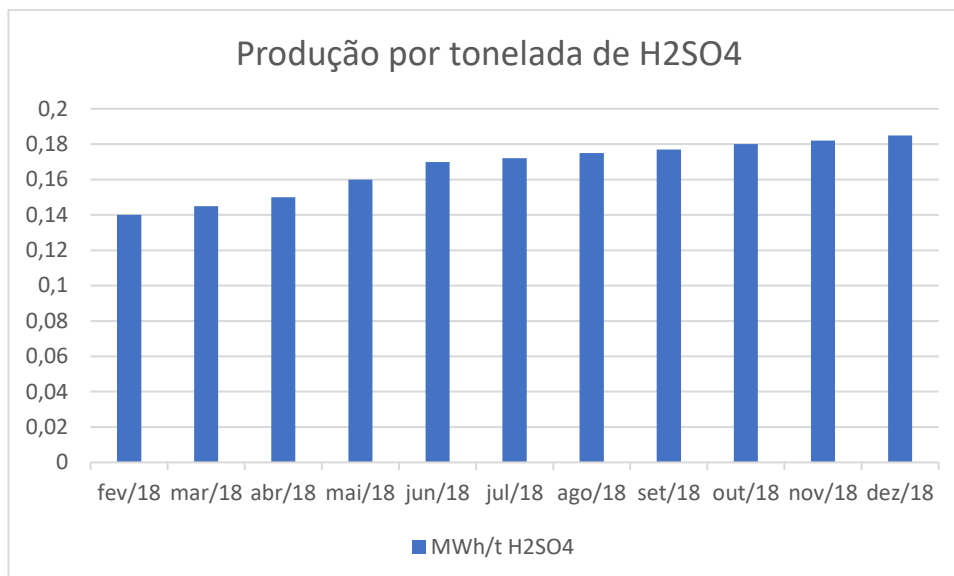
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o Gráfico 5, percebe-se que o consumo de energia no ano de 2019 foi bem menor, se comparado ao ano de 2018. Essa redução se deve a outras estratégias que a empresa adotou, como paralisação de processo produtivo em alguma planta, que não serão analisadas neste trabalho. O fato a ser considerado é o aumento de 14,25% da energia gerada no decorrer de 2019, se comparado ao ano de 2018.

A quantidade de energia produzida pelas turbinas depende diretamente da quantidade de vapor produzida pela planta. Assim sendo, quanto mais ácido sulfúrico (H_2SO_4) é produzido, maior calor é gerado no processo, conseqüentemente, mais vapor é produzido. Quanto mais vapor, maior a geração de energia pelas turbinas.

Dito isso, para determinar a eficiência na geração de energia, divide-se a energia gerada por hora (MWh) pela quantidade produzida de ácido sulfúrico (H_2SO_4). O Gráfico 6 expõe o índice de eficiência de geração no decorrer do ano de 2018.

Gráfico 6 – Produção por tonelada de H_2SO_4 .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que houve um aumento do índice em 20% em relação ao período antes dos ajustes realizados. É possível verificar, ainda, o aumento da produção de H₂SO₄ em função do aumento de energia gerada do decorrer do ano de 2018.

A produção de H₂SO₄, fundamental ao processo produtivo de fertilizante, manteve-se no valor alto a partir de junho/2018. Isso pode ser inferido devido ao consumo total de energia ter aumentado em 2018 e à produção de energia ter tido uma redução de consumo por tonelada de H₂SO₄.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

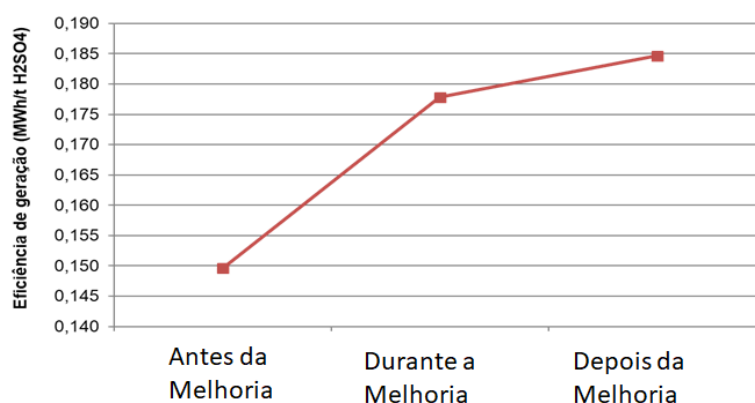
Este estudo de caso teve por objetivo analisar a produção energética de uma turbina a vapor após ter sofrido algumas modificações. Foram analisadas, no decorrer deste trabalho, essas alterações, tendo em vista alguns fatores, como consumo, rendimento e produção de energia do equipamento. Conforme salientado, a turbina, objeto desta análise, está instalada em uma planta de cogeração, ou seja, a geração de energia não é sua principal função, e sim uma função secundária ao processo, apesar de não menos importante.

Para produzir energia, a turbina converte a energia cinética do vapor em trabalho mecânico, girando seu eixo. Esse vapor consumido pela turbina é gerado através do processo de produção de ácido sulfúrico, o qual possui uma condição diretamente proporcional: quanto mais ácido produzido, ou seja, maior a carga da planta; mais calor é gerado no processo e, por conseguinte, a produção de vapor aumenta, o que significa maior produção de energia.

Devido a todo o contexto envolvido para a turbina produzir mais energia, o qual depende primordialmente das condições operacionais da fábrica, a análise de produção energética torna-se um pouco complicada. Isso ocorre porque as condições operacionais do processo influenciam diretamente no rendimento da turbina, pois essa depende de variáveis, como vazão de entrada de vapor, temperatura e pressão. Essas variáveis resultam do funcionamento de outros equipamentos, os quais, caso não estejam em boas condições operacionais, irão influenciar, conseqüentemente, no rendimento da turbina.

Ao analisar os dados coletados nesta pesquisa, tornou-se evidente o aumento da produção de energia em relação à produção por tonelada de H₂SO₄, tal como demonstrado no Gráfico 7:

Gráfico 7 – Produção de energia por tonelada de H₂SO₄.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se adotar os ajustes realizados na turbina como melhorias, pois, no contexto geral, houve melhora na eficiência do equipamento. Entretanto, esse aumento da eficiência não pode ser relacionado exclusivamente às melhorias realizadas, devido ao fato de que, durante a implementação delas, houve também modificações em outros equipamentos na planta Sulfúrico, as quais não foram detalhadas neste trabalho. Essas outras alterações, conforme assinalado, influenciam também nas variáveis inerentes à operação da turbina, o que torna a estratificação da eficiência desse equipamento difícil de ser relacionada exclusivamente às melhorias aqui analisadas.

Todavia, essas melhorias ajudaram no rendimento da turbina de alguma forma, pois, com elas, os parâmetros inerentes à sua operação foram aperfeiçoados. O ajuste realizado no controle das válvulas de admissão e de extração diminuiu a oscilação da produção de energia, ou seja, gerou maior estabilidade, além da melhoria do vácuo gerado da turbina, através das trocas das válvulas de injeção de vapor motriz, o que promoveu um maior aproveitamento do vapor.

Em vista dessas considerações, percebeu-se, com a realização deste trabalho, a oportunidade de melhorar a eficiência do equipamento, o qual não possui um parâmetro de consumo individual de vapor de entrada, sendo esse um fator crucial para o cálculo de rendimento. Ademais, acredita-se que as melhorias realizadas na turbina impactaram positivamente em sua operação, embora não tenham sido as únicas responsáveis por esse resultado.

Nessa medida, para a realização de uma análise estratificada do rendimento da turbina faz-se necessária uma coleta de dados mais abrangente de todos os parâmetros que influenciam a operação, o que poderá ser elaborado em trabalho futuro. A empresa, observando essa necessidade do controle da vazão da entrada, está alterando, durante esse ano de 2020, a lógica de cálculo nos controladores (PLC) das turbinas, incluindo um pacote de cálculos do consumo de vapor em função dos dados operacionais, conforme apresentados neste trabalho. O objetivo desse incremento é permitir uma avaliação em tempo real (*online*) do consumo de vapor no supervisão (IHM) dos sistemas de cogeração.

REFERÊNCIAS

ALBERICHI, M. **Estudo das instalações e operações de caldeiras de uma indústria de produtos químicos do estado do Paraná, sob ótica da NR-13 E NR-28**. 2013. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2000. 122 p.

BEGA, E. A. (Org.). **Instrumentação Industrial**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. 694p.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 659 p.

BRASIL, N. P. **Apostila de Co-geração**. Notas de aula do curso de Engenharia de Equipamentos. 2005. Disponível em: http://www.professores.uff.br/dulcemargarcia/wp-content/uploads/sites/39/2017/07/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf. Acesso em: 15 out. 2019.

CAMPOS, V. R. Ácido Sulfúrico. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3, p. 210-214, jun. 2011. DOI: 10.5935/1984-6835.20110024. Disponível em: <http://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/148/167>. Acesso em: 10 out. 2019.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução à Cogeração**. 2. ed. Universidade Técnica de Lisboa – Área Científica de Energia, Lisboa, 2009. Disponível em: http://www.marioloureiro.net/tecnica/cogeneracao/Cogeneracao_ed2p0.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia Científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. 161 p.

CHAGAS, M. Descritivo de processo unidade de produção de ácido sulfúrico. Araxá: Mosaic Fertilizantes, 2019.

CHAMPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Austrália: AMGH Editora Ltda, 2013. 671 p.

MB CONSULTORES. **Processo de Fabricação de Ácido Sulfúrico**. 1999. Disponível em: <http://h2so4.com.br/downloads/Download/Tecnologia/MBC/MB%20CONSULTORES%20-%20Manual%20de%20Acido%20Sulfurico%20.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

NG Metalúrgica. Disponível em: <https://www.ngmetalurgica.com.br/energia/condensacao/>. Acesso em: 20 set. 2020.

FERRÃO, P. D. M.; WEBER, F. A. **Cogeração: uma abordagem socioeconômica**. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE 2001, 2001, PUCRS, Porto Alegre-RS. Brasília-DF: Associação Brasileira de Educação em Engenharia, 2001.

Disponível em: <http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/18/trabalhos/GDR007.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

FERRAZ, F. **Turbinas a Vapor**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), 2008. Disponível em: <https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/turbinas-a-vapor.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

FRANÇA, C. S. **Viabilidade econômica de um projeto de cogeração via um turbogerador de eletricidade**. Orientador: Prof. Dr. João Rondolfo Pontes. 2008. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GARCIA, A. Condensador, 2013. Disponível em: <http://termoindustrial11132.blogspot.com/2013/06/el-condensador-es-un-elemento.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

IENO, G; NEGRO, L. **Termodinâmica**. 1. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 226 p.

IFM Brasil. Transmissores de vibração. Disponível em: <https://www.ifm.com.br/pt/product/VTV122>. Acesso em: 21 ago. 2020.

LORENZO, E. P.; ARAÚJO, G. L. **Eletricidad solar - ingeniería de los sistemas fotovoltaicos**. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid - Instituto de Energía Solar, 1994. 184 p.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2015. 277 p.

NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. K. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 10, nº 3, artigo 9, Rio de Janeiro, set. 2012. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/cadernosebape/article/view/5488/4208>. Acesso em: 20 set. 2020.

PAKARI. Modelos de Termopares. Disponível em: <https://www.pakari.com.br/modelos-termopares>. Acesso em: 21 ago. 2020.

PATSKO, L. F. **Tutorial Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores**. 2006. Disponível em: https://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf. Acesso em: 18 out. 2020.

PIRES, E. A.; MULLER, J. H.; SUARES, R. A. **Estudo de viabilidade técnica/econômica para instalação de um termogerador em queimador de gases de estufas**. Orientador: Prof. Me. Clider Adriane de Souza Silva. 2013. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANDFORT, J. **Máquinas Térmicas**. 1. ed. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires, 1965. 105 p.

SILVA, M. A. O. **Estabelecimento de Rotinas de Operação e Orientações de Manutenção para a Planta Termelétrica do den/feg/unesp**. Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli. 2013. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

SILVA JUNIOR, E. A. **Estudo e otimização do sistema de automação de uma caldeira flamotubular a GLP, com foco nos controles de consumo de combustível e produção de vapor**. 2015. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Automação Industrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2015.

SMAR TECHNOLOGY COMPANY. Disponível em: <https://www.smar.com/brasil/produto/ld301-hart-4-to-20-ma-transmissores-inteligentes-de-pressao>. Acesso em: 21 set. 2020.

SOUSA, J. W. **Análise climatológica do potencial eólico no estado de Minas Gerais**. Orientador: Prof. Dr. José Maria Nogueira da Costa. 1993. 103 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

TecnoGera. Entenda como é o princípio de funcionamento de um gerador de corrente alternada, 2015. Disponível em: <https://www.tecnogera.com.br/blog/entenda-como-e-o-principio-de-funcionamento-de-um-gerador-de-corrente-alternada>. Acesso em: 20 ago. 2020.

WEG. **Características e Especificações de Geradores**. Unidade Energia Jaraguá do Sul – Santa Catarina, 2014. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracter-sticas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>. Acesso em: 15 out. 2019.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205 p.

NG Metalúrgica. **Manual de instruções: turbina h3/800S**. Doc.:MO-413641-001. 2008. 403p.