

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Luiz Gustavo Vilela dos Reis

Controle e proteção de turbogeradores em indústrias sucroenergéticas

Ilha Solteira
2025

Luiz Gustavo Vilela dos Reis

Controle e proteção de turbogeradores em indústrias sucroenergéticas

Trabalho de graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
como parte dos requisitos para obtenção
do título de bacharelado em Engenharia
Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Jean Marcos
de Souza Ribeiro

Ilha Solteira
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R375c Reis, Luiz Gustavo Vilela dos.
 Controle e proteção de turbogeradores em indústrias sucroenergéticas /
Luiz Gustavo Vilela dos Reis. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
 113 f. : il.

 Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

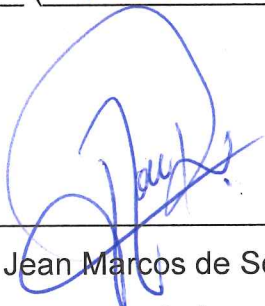
 Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

 Inclui bibliografia

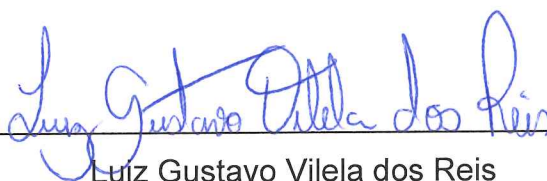
 1. Sucroenergético. 2. Cogeração. 3. Turbogenerador.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

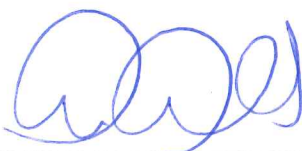
Aos vinte e quatro dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **Luiz Gustavo Vilela dos Reis**, matriculado sob o nº 181050481, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, o Prof. Dr. Carlos Antonio Alves e o Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Controle e proteção de turbogeradores em indústrias sucroenergéticas", obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito aprovado.



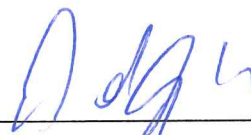
Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- orientador -



Luiz Gustavo Vilela dos Reis
- discente -



Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Membro da Banca -



Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que desde o princípio me motivou e orientou para que um dia fosse possível concluir a jornada acadêmica na engenharia elétrica. Em especial, aos meus pais que com seu esforço, possibilitaram que eu conseguisse viver este período de formação em Ilha Solteira, dando-me recursos para estudar e conselhos para lidar com cada desafio enfrentado no decorrer de cada semestre.

Aos meus professores da época escolar, Eduardo, Dona Lúcia, Claudia, Inês, Augusto, Sérgio, Joviano, Rodolfo, Mariza, Toshico, Careca, Fernando, Elaine, Simone, Márcio e diretores Jaime e Dalva Gonzaga, que mesmo sem o contato diário que tínhamos na escola, sempre que possível me incentivavam para que eu desse o meu melhor independente da situação.

Aos meus professores da faculdade, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, que desde a primeira aula que tive com ele, sua maneira de demonstrar e trazer o conhecimento de forma didática, motivou-me a realizar este trabalho e me fez ter este ramo como meu favorito dentro da engenharia elétrica.

Aos meus colegas de trabalho, que desde o período de estágio, não mediram esforços para ensinar e me inserir no meio do setor sucroenergético e com esta oportunidade, possibilitou que conceitos antes apenas teóricos, pudessem ser compreendidos na realidade, mostrando como é importante ter o conhecimento técnico, em junção com a gestão de custo e pessoas para que no final, o trabalho seja realizado com o máximo de segurança, eficiência e qualidade.

AGRADECIMENTOS

Sou grato primeiramente a Deus, pela oportunidade da vida e pela chance que poder cursar engenharia elétrica na UNESP em Ilha Solteira. Em seguida, agradeço a minha família que todos dias oraram por mim e sempre estiveram comigo e comemorando cada passo, cada conquista no decorrer destes anos.

Aos meus amigos, Erick, Gabriel e Vinícius que desde o primeiro semestre estivemos juntos, estudando, ajudando uns aos outros e aprendendo com as experiências de cada um e com esta bagagem, foi possível que conseguíssemos passar pelos desafios da graduação.

Aos meus colegas de trabalho na ATVOS Bioenergia – Unidade Conquista do Pontal que me ajudam todos os dias na caminhada do trabalho e amadurecimento profissional, pois o apoio de vocês está sendo essencial para a construção de minha carreira, para que eu a cada dia me torne um profissional melhor.

Agradeço a minha futura noiva, Beatriz, que me motivou em todo período da faculdade, tantos nos momentos difíceis, quantos nos instantes mais tranquilos, e agradeço por suas orações e torcida por mim. Todo o apoio até hoje, faz com que a todo momento eu sempre tente ser uma pessoa melhor.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência” (Henry Ford,
1922).

RESUMO

No presente trabalho, foi realizado uma análise do funcionamento da cogeração no setor sucroenergético, trazendo a evolução histórica do setor, projeções de crescimento até 2030 e uma revisão do processo industrial, desde a entrada de cana de açúcar até o produto final, sendo etanol e açúcar, para que sejam interligados os conceitos de manutenção elétricos, mecânicos e de instrumentação, com os associados a produção a fim de compreender os aspectos que estão em torno da tomada de decisão dos operadores de campo no setor de geração de energia e como o sistema de controle atua para estabilizar os turbogeradores com o surgimento de distúrbios elétricos e variações no processo. Através deste conteúdo, a planta industrial considerada foi a unidade Conquista do Pontal do grupo Atvos Bioenergia, que contém três turbogeradores, sendo dois de contrapressão e um de condensação, sendo respectivamente de 50MVA, 62,5MVA e 25MVA e durante o trabalho, foi realizado análise de falha referente a uma ocasião de desarme dos geradores. Com a metodologia de estudo definida internamente, com diagramas de Ishikawa, “5W2H”, matriz dos porquês e a matriz de priorização “GUT”, foi possível diagnosticar problemas e causas raízes relacionadas e estes resultados ressaltaram na importância do conhecimento das variáveis do processo da planta com questões mecânicas, elétricas, de automação, controle e proteção dos turbogeradores.

Palavras-chave: Sucroenergético; Cogeração; Turbogenerador; Proteção; Controle; Análise de falha.

ABSTRACT

In this work, an analysis of the functioning of cogeneration in the sugar-energy sector was carried out, bringing the historical evolution of the sector, growth projections until 2030 and a review of the industrial process, from the entry of sugarcane to the final product, being ethanol and sugar, so that the concepts of electrical, mechanical and instrumentation maintenance are interconnected, with those associated with production in order to understand the aspects that surround the decision-making of field operators in the energy generation sector and how the control system acts to stabilize the turbogenerators with the emergence of electrical disturbances and variations in the process. Through this content, the industrial plant considered was the Conquista do Pontal unit of the Atvos Bioenergia group, which contains three turbo generators, two of which are backpressure and one is condensing, with capacities of 50 MVA, 62.5 MVA and 25 MVA respectively. During the work, failure analyses were performed regarding three generator tripping occasions and with the internally defined study methodology, with Ishikawa diagrams, “5W2H”, the why matrix and the “GUT” prioritization matrix, it was possible to diagnose problems and related root causes and these results highlighted the importance of knowledge of the plant process variables with mechanical, electrical, automation, control and protection logic issues.

Keywords: Sugar energy; Cogeneration; Turbogenerator; Protection; Control; Failure analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disseminação da cana de açúcar.....	4
Figura 2 - Canavial, Fujian, China.....	4
Figura 3 - Usina de açúcar em Ghor al-Safi (Zoara), na Jordânia.	5
Figura 4 - Moinho de açúcar no Castelo Kolossi, na ilha de Chipre, datado de meados de 1400.	6
Figura 5 - Imagem de satélite da Ilha da Madeira, agosto de 2016.	7
Figura 6 - Canal de irrigação elevado, na Madeira.	8
Figura 7 - Comércio triangular entre 1500 à 1800.	9
Figura 8 - Mulheres escravizadas pegando cana-de-açúcar e carregando-a para uma carroça de bois na Louisiana-EUA.	10
Figura 9 - Cogeração, exemplo.	18
Figura 10 - Cogeração, topping (a) e bottoming (b).	18
Figura 11 - Ciclo Rankine Convencional (CRC).	21
Figura 12 - Ciclo de Brayton.	22
Figura 13 - Ciclo combinado.	22
Figura 14 - Processo - Fluxo.	23
Figura 15 - Processo da usina sucroalcooleira.	24
Figura 16 - Hilo.	25
Figura 17 - Mesa alimentadora.	26
Figura 18 - Preparo de Cana.	26
Figura 19 - Terno de moenda (a) e Rolos (b).	27
Figura 20 - Fluxograma da moenda.	28
Figura 21 - Esquema de uma caldeira.	30
Figura 22 - Fluxograma da geração de vapor.	32
Figura 23 - Fluxograma da ETA.	33
Figura 24 - Fluxograma da ETALG.	34
Figura 25 - Fluxograma da Casa de Força.	35
Figura 26 - Fluxograma do tratamento de caldo.	37
Figura 27- Fluxograma da fábrica de açúcar.	38
Figura 28 - Fluxograma da fermentação.	39

Figura 29 - Fluxograma da destilaria.	41
Figura 30 - Turbina de Herón.	43
Figura 31 - Turbina à vapor de De Laval.	43
Figura 32 - Turbina a vapor de ação (a) e reação (b).	45
Figura 33 - Turbina de contrapressão.	46
Figura 34 - Turbina de condensação.	47
Figura 35 - Componentes turbina.	47
Figura 36 - Carcaça.	48
Figura 37 - Rotor.	49
Figura 38 - Palheta.	49
Figura 39 - Diafragma (a) e porta-palheta (b).	50
Figura 40 - Fita simples (a) e fita múltipla (b).	50
Figura 41 - Pistão de compensação (a) e bucha de compensação (b).	51
Figura 42 - Componentes presentes no redutor de turbogeradores.	51
Figura 43 - Eixo de alta rotação (a) e de baixa rotação (b).	53
Figura 44 - Gerador síncrono de 2 polos salientes.	54
Figura 45 - Densidade do fluxo no entreferro (a) e a tensão gerada (b).	54
Figura 46 - Gerador síncrono.	56
Figura 47 - Carcaça do Gerador síncrono.	56
Figura 48 - Eixo maciço (a) e costelado (b).	57
Figura 49 - Exemplo de tampa.	57
Figura 50 - Exemplo de estator.	58
Figura 51 - Resfriamento.	59
Figura 52 - O sistema de bobinagem de alta tensão.	60
Figura 53 - Unidade hidráulica.	61
Figura 54 - Trocador de calor.	62
Figura 55 - Filtros duplos.	62
Figura 56 - Bomba engrenagem (a) e de fusos (b).	63
Figura 57 - Giro-lento.	64
Figura 58 - Esquema do turbogerador com a unidade hidráulica.	64
Figura 59 - Condensador.	65
Figura 60 - Esquema do conjunto do condensador.	66
Figura 61 - Ejetor.....	66

Figura 62 - Sensoriamento de vibração.	68
Figura 63 - Pick-up Magnético (MPU).	69
Figura 64 - Grandezas medidas em um turbogerador.	70
Figura 65 – Fecho-rápido.	71
Figura 66 - Esquema de interação entre dispositivos e fecho rápido.	73
Figura 67 - Esquema de interação entre botoeiras e fecho rápido.	73
Figura 68 - Exemplo de “Rack” dos pressostatos.	74
Figura 69 - Esquema de interação entre o CPC e as válvulas de regulação.	75
Figura 70 - Esquema de servomotor.	76
Figura 71 - SEL 300G.	79
Figura 72 - 505.	80
Figura 73 - CPC (a) e seu esquemático (b).	82
Figura 74 - DSLC.	84
Figura 75 - MSLC.	85
Figura 76 - UNITROL F ABB.	87
Figura 77 – Sopragem de linha.	88
Figura 78 – Exemplo de interligação entre componentes.	90
Figura 79 - Diagrama de espinha de peixe desenvolvido.	92
Figura 80 – Matriz de priorização.	92
Figura 81 - Abertura das válvulas de regulação.	93

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Espécies da cana de açúcar.....	12
Quadro 2 – Cronograma da disseminação da cana de açúcar.....	13
Quadro 3 – Fases do programa Proálcool.....	15
Quadro 4 – Conceitos referentes à exergia.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do vapor superaquecido	88
Tabela 2 - Características da água de resfriamento	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
CA	Corrente alternada
CBIOS	Créditos de Descarbonização
CC	Corrente contínua
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
CPC	Conversor de corrente em pressão
CRC	Ciclo Rankine Convencional
DSLC	<i>Digital Synchronizer and Load Control</i>
ETA	Estação de tratamento de água
ETALG	Estação de tratamento de água de lavagem de gases
FEM	Força eletromotriz
GEE	Gases de efeito estufa
GL	Gay-Lussac
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
MPU	<i>Pick up</i> magnético
MSLC	<i>Master Synchronizer and Load Control</i>
ORC	Ciclo Rankine Orgânico
PAC	Policloreto de alumínio
PBU	Peso do bolo úmido
PCTS	Pagamento de cana por teor de sacarose
PROALCOOL	Programa Nacional do Alcool
RENOVABIO	Política Nacional de Biocombustíveis
RAF	Relatório de análise de falha

RPA	Relatório preliminar de anomalia
RPM	Rotação por minuto
RTDS	<i>Resistance Temperature Detectors</i>
SAE	Sociedade dos engenheiros automotivos
SEL	Schweitzer Engineering laboratories
SER	<i>Sequential Events Recorder</i>
UCP	Atvos Bionergia Conquista do Pontal

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Eficiência de uma máquina térmica
η_{Carnot}	Eficiência de Carnot
f_e	Frequência elétrica
φ	Fluxo magnético
λ	Fluxo concatenado

SUMÁRIO

1 Introdução	1
2 Visão histórica da cana de açúcar	3
2.1 Origem e disseminação da cana de açúcar pelo mundo	3
2.2 O programa nacional do álcool (Proálcool)	14
3 Processo industrial de uma usina sucroenergética	17
3.1 Cogeração	17
3.2 Processo industrial de uma usina	23
4 Turbogenerador no setor sucroalcooleiro.....	42
4.1 Turbinas à vapor	42
4.2 Redutor de velocidade	51
4.3 Gerador Síncrono.....	53
4.4 Unidade de lubrificação.....	60
4.5 Condensador	65
5 Proteção e controle de turbogeradores.....	67
5.1 Localização do sensoriamento no turbogerador	68
5.2 Fecho-rápido.....	70
5.3 Válvula solenoide	72
5.4 Válvula de regulação.....	74
5.5 Servomotor	75
5.6 Relé SEL 300G.....	77
5.7 Regulador de velocidade 505 - Woodward	79
5.8 CPC-II – Woodward.....	80
5.9 DSLC (Digital synchronizer and load control)	82
5.10 MSLC (Digital synchronizer and load control)	84
5.11 Unitrol F Series – ABB (AVR)	86
5.12 Qualidade do vapor e da água de refrigeração	87
5.13 Diagrama do controle de um turbogerador (exemplo)	89
6 Análise de falha na ATIVOS Bioenergia Conquista do Pontal	91
6.1 Problema de oscilação de rotação do turbogerador-01.....	91
7 Considerações finais.....	94
Referências	95

1 INTRODUÇÃO

Com a experiência teórica obtida durante o período acadêmico no curso de engenharia elétrica, o próximo passo para o enriquecimento profissional passaria ser o estágio que foi realizado na unidade sucroenergética de Conquista do Pontal do grupo ATVOS em Mirante do Paranapanema e com o primeiro contato com o ambiente industrial, houve a possibilidade de primeiramente, compreender sobre o fluxo do processo, pois antes de entender aspectos mais específicos da manutenção elétrica, conceitos que permeiam a entrada de matéria prima até o produto final foram de extrema importância para compreender e construir uma linha crítica que deve ser respeitada e bem planejada para que não haja paradas inesperadas do processo, garantindo a continuidade do funcionamento da planta.

Desta maneira, com os estudos do fluxo de cada setor interno da indústria, e trazendo conceitos do período acadêmico, o trabalho de graduação foi desenvolvido baseado na importância da geração de energia elétrica para a planta industrial e como esta garante vapor para o processo e uma alta eficiência energética e com isto, através dos estudos de proteção e controle de turbogeradores, foi possível aplicar conceitos de resolução de problemas baseados no Lean Six Sigma nas análises de falha realizadas e construir planos de ação para saneamento de problemas com os turbogeradores, sendo estes compostos basicamente por uma turbina e o gerador, e dependendo da rotação da primeira, pode haver a existência de um redutor de velocidade para adequação da rotação na entrada do gerador síncrono.

Considerando o período inicial de estágio e as atividades exercidas atualmente que se referem a engenharia de manutenção e confiabilidade da planta, introduziu-se conceitos para análises de falha, que através de uma metodologia interna e a reunião de uma equipe multidisciplinar, diversos problemas relacionados a manutenção e paradas inesperadas da planta, podem ser estudadas, e a partir disto, estruturar planos de ação, a fim de garantir a resolução do problema e construção de uma malha de prevenção para que a mesma falha ou algo semelhante, não ocorra novamente. Com estas experiências vivenciadas, notou-se uma grande importância na questão de comunicação de diversos ramos da engenharia, como questões mecânicas, elétricas, operacionais, de instrumentação e automação, pois a resolução de certos problemas internos na planta que influenciam nos dados de eficiência industrial podem envolver estes ramos, mesmo que aparentemente não estejam envolvidos em um determinado problema, sendo essencial o desenvolvimento da interlocução entre essas áreas.

O presente trabalho consiste em trazer um a importância da cogeração para o setor sucroenergético na questão de eficiência energética com o estudo do processo industrial

alinhado com conceitos de gestão, planejamento e resolução de problemas de manutenção.

A primeira etapa do trabalho consiste no registro histórico do uso da cana de açúcar até os dias de hoje, evidenciando a evolução desta indústria com o passar dos anos e a perspectiva de futuro e inovação para o setor, que atualmente faz o Brasil ser o país que na safra 2023/2024 registrou mais de 700 milhões de toneladas da cana de açúcar, reafirmando sua posição de liderança no mercado global, desempenhando um papel crítico na matriz energética e econômica, contribuindo para o desenvolvimento de regiões, gerando milhares de empregos e reiterando a questão de sustentabilidade com os biocombustíveis para uma transição energética que preserve o meio ambiente (BRASIL... 2024).

A segunda etapa se refere ao estudo do processo industrial, reforçando a importância de entender o fluxo produtivo, desde a recepção da matéria prima, até o produto final, pois com o conhecimento das variáveis do setor, conceitos de manutenção podem ser aplicados e planejados de maneira mais efetiva, a fim de garantir a continuidade do processo, respeitando todas as questões de segurança e maximizando e otimizando as atividades a serem exercidas.

A terceira etapa foi dedicada para adentrar um capítulo importante no processo industrial, que é a cogeração, então nesta parte uma introdução foi preparada para o entendimento do que é este processo e como este é importante para a geração de energia elétrica e energia térmica para o processo, visando um melhor aproveitamento do potencial energético da queima do bagaço nas caldeiras.

A quarta etapa foi definida para contemplar os aspectos de um turbogerador, desde a sua constituição básica que é formada por uma turbina, redutor e gerador síncrono e ao estudo mais detalhado de cada um destes componentes, para que seja entendido a função de cada um e seu funcionamento.

A quinta etapa inicia-se o objetivo do trabalho, que é o estudo de proteção e controle de um turbogerador, ressaltando questões de automação e operacionalidade com a comunicação da rede interna com os relés de proteção e como isto influencia no resultado no controle do turbogerador tendo como objetivo final manter a geração de energia elétrica estabilizada e com vapor de escape para o processo de maneira a atender os requisitos do processo de fabricação de açúcar e etanol. Assim, foi levantado um estudo sobre as proteções envolvidas no turbogerador que serve de base para a sexta etapa que consiste em colocar em prática, métodos de engenharia de manutenção para a resolução de dois problemas que ocorram envolvendo o turbogerador e um imprevisto de início de safra que acabou atrasando o retorno da moagem de cana de açúcar.

2 VISÃO HISTÓRICA DA CANA DE AÇÚCAR

Nesta seção, o assunto discorrido se refere ao caminho pelo qual a cana de açúcar foi submetida pelas civilizações no decorrer de anos.

2.1 ORIGEM E DISSIMINAÇÃO DA CANA DE AÇÚCAR PELO MUNDO

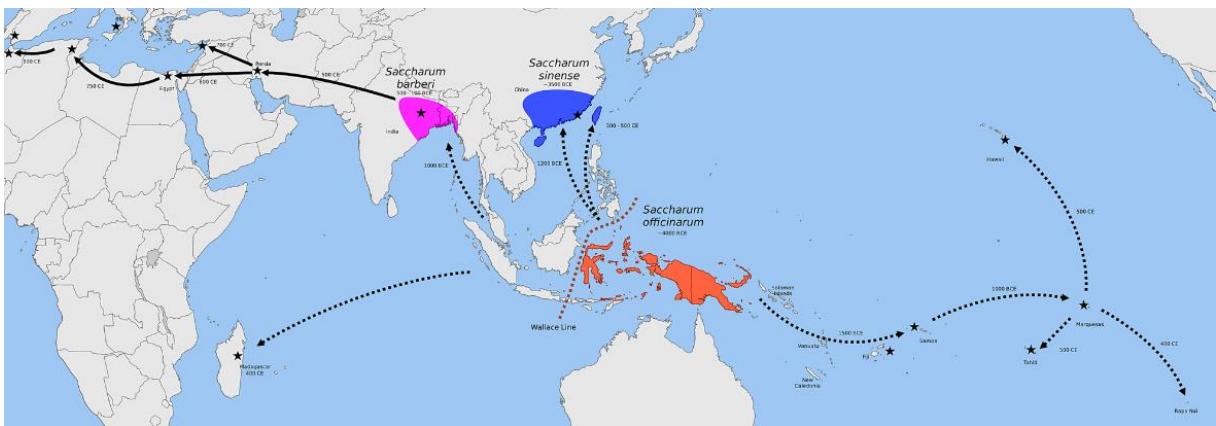
Cana de açúcar, cujo nome científico é *Saccharum officinarum*, teria como centro de origem a Nova Guiné e baseando-se no consenso científico, o cultivo desta gramínea gigante tropical pode ter ocorrido há cerca de 8.000 a 10.000 atrás e acredita-se que tal espécie de cana descenda da selvagem *Saccharum robustum*. Por outro lado, outra espécie também pode ser relacionada, sendo a *Saccharum edule*, que tinha folhas comestíveis, e estima-se o processo de seu uso e cultivo por volta de 6.000 atrás, na Papua e desta maneira dependendo do local e das características da cana de açúcar, havia a possibilidade do uso como material de construção para aquelas com uma quantidade de fibra elevada, indicando uma variedade de aplicações e uma notável característica de adaptabilidade desde os primórdios (SUGARCANE, 2025).

Analisando a discrepância nas datas variando entre 6.000-10.000 atrás, fica sugerido que pesquisas sobre a história inicial da cana de açúcar estão ainda em desenvolvimento e o cronograma de sua primeira cultivação pode ser refinado à medida que novas evidências arqueológicas surgem, porém seguindo as informações históricas, houve uma migração da Nova Guiné para outras ilhas do Pacífico, incluindo a Micronésia e a Polinésia seguindo para o Sudeste Asiático, Indonésia, Filipinas, China e Índia há pelo menos 3000 anos atrás e tais eventos demonstraram a importância da ação humana na dispersão de espécies cultiváveis pelo planeta, mostrando como as plantas viajavam com as pessoas, tornando-se parte integrante de suas culturas e modos de vida. Na Figura 1, ilustra-se um mapa-mundi referenciando a disseminação da cana de açúcar e na Figura 2, um exemplo de plantação na China (HERMSEN, 2023).

Os primeiros métodos de cultivos passam se ser disseminados e a propagação da cana de açúcar era feita principalmente através do plantio de pedaços do caule, e estes eram plantados em fileiras ou covas rasas e por fim cobertas com terra e seu cultivo dependia de clima quente e uma quantidade significativa de água e desta maneira, observa-se que as técnicas iniciais de processamento iniciou-se basicamente com a cana sendo simplesmente

mastigada para obtenção de seu sabor doce, porém com a disseminação na Índia, começou a espremer os talos para produzir açúcar e o refino inicial envolvia realizar a moagem a cana para extrair o suco e em seguida era aquecido e fervido ou podendo ser apenas passar pelo processo de secagem ao sol para a cristalização da sacarose. A fabricação de açúcar foi mantido pela Índia em segredo contribuindo para sua vantagem econômica inicial na região (HERMSEN, 2023).

Figura 1 – Disseminação da cana de açúcar.



Fonte: (HERMSEN, 2023).

Figura 2 – Canavial, Fujian, China.



Fonte: (HERMSEN, 2023).

A introdução da cana de açúcar no oriente médio e norte da África, iniciou-se na Pérsia por Dario I após a invasão da Índia em 510 a.C e o cultivo e processamento do açúcar alcançaram a Pérsia por volta de 600 d.C.. A partir daí, o cultivo da cana-de-açúcar e a produção de açúcar se disseminou para o oriente médio (mundo islâmico), o Norte da África, a Península Ibérica e a Sicília e com o decorrer dos anos, métodos de irrigação foram

desenvolvidos para irrigar a plantação de cana-de-açúcar em ambientes mais secos, e engenhos de açúcar mais sofisticados foram construídos, utilizando água para mover as pedras de moagem que trituravam a cana para extrair o caldo e daí surgiram os primeiros potes cônicos para separar o açúcar do melaço. Um exemplo de disseminação foi a introdução no Egito pelos muçulmanos ocorrendo em 710 d.C. e este país se tornou um importante produtor de açúcar, atingindo o pico de produção por volta dos anos 1000-1350. Os egípcios desenvolveram técnicas de clarificação, cristalização e refino em que a cana de açúcar era submetida a métodos simplificados de clarificação envolviam as etapas de fervura do suco e a adição de cal para remoção das impurezas e isto associado a continuidade da fervura, aplicação da prática de coagem, decantação, moldagem e repetição deste processo, o Egito passou a ter pelo açúcar "mais branco e puro" da época. Como exemplo, Na Figura 3, exibe-se as ruínas de um local na Jordânia, onde teoricamente havia sido produzido açúcar entre os séculos XIV à XVIII, demonstrando a forma e aplicação das técnicas árabes no uso da cana de açúcar. (HERMSEN, 2023).

Figura 3 - Usina de açúcar em Ghor al-Safi (Zoara), na Jordânia.



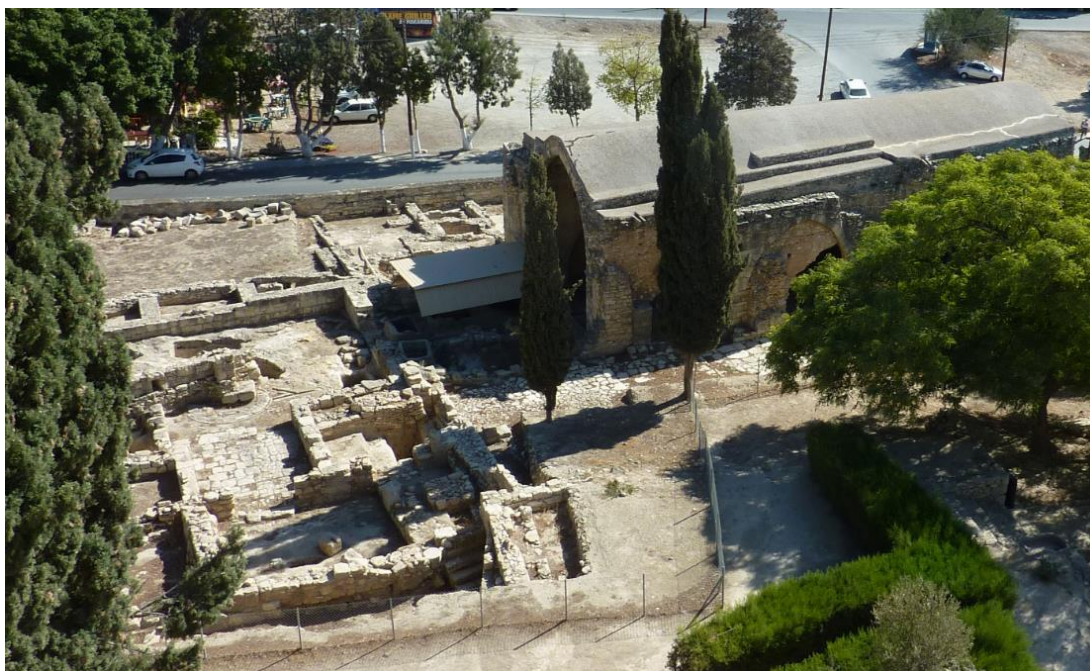
Fonte: (HERMSEN, 2023).

O cultivo da cana de açúcar avança para oeste, através do Norte da África, chegando ao Marrocos cuja produção começou no final dos anos 800, atingindo seu auge entre 1000 e

1200. A produção de açúcar foi introduzida na Europa cristã durante as Cruzadas, ao final do século XI até o final do século XIII, quando forças cristãs invadiram territórios islâmicos ao longo do oriente do Mediterrâneo e o conhecimento sobre o açúcar entre os antigos gregos e romanos abrangia apenas ao seu uso como medicamento e especiaria, sendo denominado pelos cruzados que retornavam da Terra Santa transportando o açúcar chamando-o de "sal doce e desta maneira, era tratado como uma mercadoria preciosa. A Europa cristã produziu açúcar pela primeira vez nos Estados Cruzados do Mediterrâneo oriental até o final do século XIII, quando foram expulsos (BENEDICT, 2005).

No final do século XIII, a produção de cana-de-açúcar migrou para as ilhas do Mediterrâneo, começando por Chipre onde a parte da mão de obra disponível era composta por trabalhadores escravizados, sendo estes capturados durante a guerra, e a outra parte era trabalho forçado realizado por pessoas que não eram escravizadas. O cultivo e a moagem de cana-de-açúcar foi encontrado também em Creta, Rodes, Sicília, Chipre e outras ilhas. Na Figura 4, ilustra-se uma construção em Chipre que servia de moinho de açúcar (HERMSEN, 2023).

Figura 4 - Moinho de açúcar no Castelo Kolossi, na ilha de Chipre, datado de meados de 1400.



Fonte: (HERMSEN, 2023).

A crescente demanda por açúcar na Europa e a oferta limitada e os altos preços no Mediterrâneo impulsionaram a busca por centros de produção mais acessíveis e em maior

escala, levando à expansão do cultivo da cana de açúcar nas ilhas atlânticas e nas Américas e nisto inicialmente destacou o papel pivotal de Portugal que D. Henrique introduziu a cana de açúcar na Ilha da Madeira e em São Tomé por volta de 1425, pois os locais possuíam condições favoráveis (localização, clima, solo, água, madeira) para o cultivo e elas inicialmente eram desabitadas e além disto, a decisão portuguesa de introduzir a cana de açúcar nas ilhas foi uma manobra econômica estratégica para diversificar suas fontes de receita após o declínio do trigo, demonstrando um planejamento econômico nos estágios iniciais da expansão europeia. Na Figura 5, ilustra-se a Ilha da Madeira. Desta forma grandes plantações foram estabelecidas utilizando mão de obra escrava e engenhos foram construídos sendo estes movidos por animais e posteriormente água, conforme ilustrado na Figura 6. O refino em grande escala começou na Madeira entre 1455 e 1480 e no final deste período, cerca de 70 navios estavam envolvidos no comércio de açúcar da Madeira. E consequentemente, a Ilha da Madeira passou a ser referida como o berço do sistema de plantação moderno e o local da primeira "revolução do açúcar" que baseou-se no desmatamento, na construção de terraços e na criação de aquedutos para que tais obras servissem para apoiar a agricultura no qual seu processo básico de produção de açúcar inicialmente era semelhante às técnicas mediterrâneas (HERMSEN, 2023).

Figura 5 - Imagem de satélite da Ilha da Madeira, agosto de 2016.



Fonte: (HERMSEN, 2023).

Figura 6 - Canal de irrigação elevado, na Madeira.



Fonte: (HERMSEN, 2023).

Posteriormente, Cristóvão Colombo visitou a Ilha da Madeira em 1478 e levou plantas de cana de açúcar para o Caribe e o modelo de cultivo de açúcar, incluindo o uso de mão de obra escravizada e as técnicas agrícolas e de processamento, foram transferidas para as Américas, especialmente para o Brasil. Os portugueses levaram a cana de açúcar de suas possessões nas ilhas atlânticas para o Brasil, utilizando seu modelo de agricultura extensiva e trabalho forçado. Neste cenário de expansão a experiência adquirida na Ilha da Madeira forneceu um modelo para a exploração colonial e a gestão de recursos em uma escala muito maior, estabelecendo seu papel essencial para a formação das paisagens agrícolas e sociais do Novo Mundo e consolidando o comércio transatlântico de escravos. O envolvimento de banqueiros genoveses e consultores sicilianos na indústria açucareira na Ilha da Madeira demonstra a natureza internacional do capitalismo e o fluxo de capital pela Europa a fim de apoiar empreendimentos lucrativos destacando a interconectividade das economias europeias durante a Era das Explorações (CANA-DE-AÇUCAR... 2020).

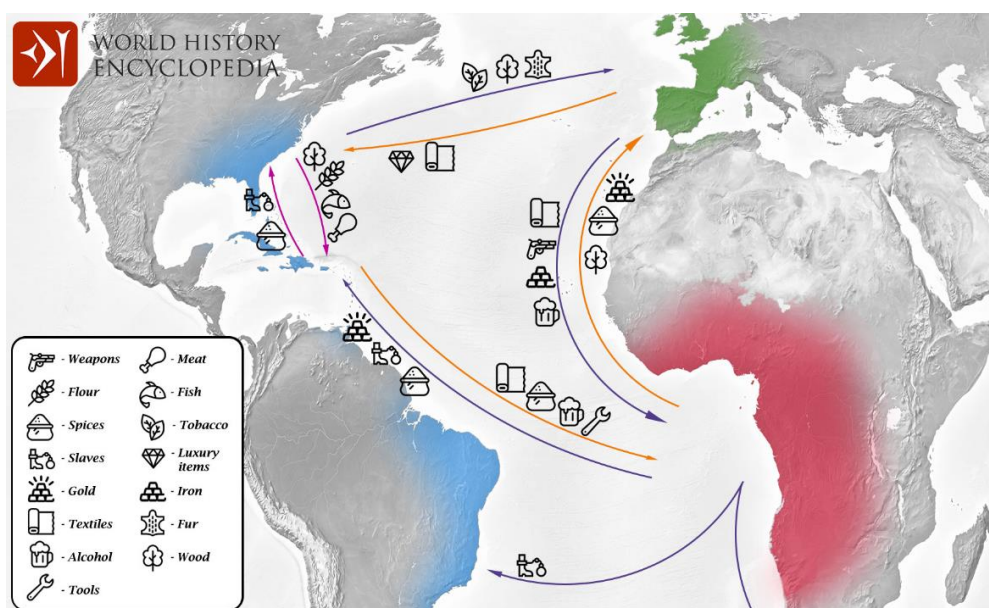
Considerando a expansão pelo Caribe, Cristóvão Colombo introduziu a cana de açúcar em Hispaniola (Haiti/República Dominicana) em sua segunda viagem em 1493 e a primeira colheita de açúcar em Hispaniola ocorreu em 1501. Os espanhóis estavam inicialmente mais interessados em ouro e prata, porém reconheceram o potencial de lucro do açúcar. O cultivo

da cana de açúcar se espalhou por outras ilhas do Caribe como a do Santo Domingo, Cuba, Porto Rico, Jamaica, Barbados, Ilhas Virgens e em paralelo a isto, o sistema de *plantation* foi desenvolvido para produção em larga escala e para isto havia uma dependência do trabalho escravizado, pois a natureza intensiva em mão de obra do cultivo e processamento da cana de açúcar nas *plantations* caribenhas abrangia todo o processo, desde o plantio até a produção de açúcar e rum, que de certa forma fortaleceu comércio transatlântico de escravos sendo a principal razão para a vinda de dez milhões de africanos para o Novo Mundo. Com o desenvolvimento das plantações e dos engenhos, os *plantations* caribenhos produziam cerca de 80-90% do açúcar consumido na Europa Ocidental (HERMSEN, 2023).

No Caribe o açúcar se tornou a cultura mais importante, impulsionando a economia ajudando no surgimento de uma classe rica de proprietários de *plantations* e o comércio colonial de melão e seu papel no comércio triangular, ligando a Nova Inglaterra, África e Índias Ocidentais impulsionou avanço econômico fazendo surgir conflitos imperialistas entre potências europeias pelo controle das ilhas produtoras. Um exemplo do avanço é Cuba que teve sua dependência na cana de açúcar e no trabalho escravo aumentar nos séculos XVIII e XIX, tornando-se a indústria açucareira mais mecanizada do mundo entre 1838 e 1880 (SUGAR... 2025).

Na Figura 7, ilustra-se um exemplo do comércio triangular estabelecido na região (HERMSEN, 2023).

Figura 7 - Comércio triangular entre 1500 à 1800.



Fonte: (HERMSEN, 2023).

Na parcela da América do Norte, a partir do século XVII, as colônias britânicas que formariam os estados e territórios originais dos EUA e elas produziram culturas como arroz e tabaco para exportação, utilizando o trabalho escravo, sendo estes provenientes do continente africano. Na porção continental, região ao longo da Costa do Golfo eram adequadas para o cultivo de cana-de-açúcar. E desta maneira, indústria da cana-de-açúcar só se desenvolveu plenamente nos EUA após a Revolução Haitiana, uma revolta de escravizados e pessoas livres de cor na colônia francesa de Saint-Domingue que começou em 1791. Durante esse período, parte da população branca de Saint-Domingue fugiu para Nova Orleans e trouxe consigo seu conhecimento sobre o cultivo e o processamento da cana-de-açúcar e além deste local, a cana de açúcar chegou à Louisiana neste mesmo período, introduzida por colonos holandeses na América do Sul (Suriname, Guiana) e no Caribe (Barbados, Ilhas Virgens. Na década de 1850, cerca de um quarto do açúcar mundial para comércio vinha da Louisiana. Na Figura 8, ilustrou-se uma gravura em que mostra escravos trabalhando na plantação de cana de açúcar na Louisiana. (HERMSEN, 2023).

Figura 8 - Mulheres escravizadas pegando cana-de-açúcar e carregando-a para uma carroça de bois na Louisiana-EUA.



Fonte: (HERMSEN, 2023).

No cenário brasileiro, a cana de açúcar foi introduzida ao Brasil por comerciantes portugueses no século XV, em torno de 1532 por Martim Afonso de Souza na Capitania de São Vicente e como os portugueses tinham experiência prévia no cultivo de cana de açúcar nas ilhas atlânticas (Madeira, Açores, Cabo Verde), e baseado no sistema de *plantation* com grandes fazendas (latifúndios) produzindo um único produto para o comércio exterior, o uso de mão de obra escravizada indígena e africana e com os projetos dos engenhos já implementados na Ilha da Madeira, fizeram com que as capitanias de Pernambuco e São Vicente ascenderam à proeminência na produção de açúcar e na Bahia se tornou outro centro inicial após o estabelecimento do governo-geral, sendo que na época o ciclo de cultivo da cana de açúcar no Nordeste do Brasil começava com o plantio em maio e a colheita de outubro a abril (HISTORY... 2025).

Houve uma rápida expansão dos engenhos e no final do século XVI, existiam 256 moinhos, oitocentos engenhos em Santa Catarina e 2.000 ao longo da costa norte do Brasil por volta de 1540. O Brasil se tornou o principal fornecedor de açúcar para os mercados europeus no final do século de XVI e se tornou o maior produtor do mundo nos séculos XVI e XVII. As principais regiões produtoras de açúcar foram, inicialmente, Pernambuco, Bahia, São Paulo e Rio de Janeiro e anos após, a Paraíba na época das invasões holandesas. O açúcar representou a primeira grande riqueza agrícola e industrial do Brasil que atingiu o pico na década de 1620, sendo a grande parte do açúcar brasileiro transitando pelos portos portugueses e para os Países Baixos, especialmente Amsterdã. A cana de açúcar e o ouro tinham quase o mesmo valor na época, confirmando o grande sucesso no seu cultivo no país (FIOMARI, 2004).

O açúcar saía do posto de primeiro lugar na geração de riquezas, cuja produção se retraiu até o final do século XIX, após a descoberta do ouro no final do século XVII em Minas Gerais. Mesmo assim, considera-se que no período entre 1500 à 1822 a renda obtida pelo comércio do açúcar tenha atingido quase duas vezes a do ouro e quase cinco vezes a de todos outros produtos agrícolas juntos, tais como café, algodão e madeiras (FIOMARI, 2004).

No final do século XIX, com a abolição da escravatura, sendo esta uma das principais fontes de mão de obra, o governo brasileiro incentivou a imigração europeia que se concentrou no interior do estado de São Paulo e com estes imigrantes, terras foram adquiridas por eles que começaram a produzir aguardente de cana-de-açúcar por conta do retorno financeiro vantajoso na época, trazendo para região a construção de novos engenhos nas regiões de Piracicaba e Ribeirão Preto, especialmente. A partir de 1910, os engenhos evoluíram para usinas de açúcar impulsionados pelo crescimento econômico paulista. Em

paralelo, a produção de açúcar crescia no Nordeste, especificamente em Pernambuco e Alagoas, que complementavam a demanda do sul (FIOMARI, 2004).

Durante a II Guerra Mundial, usinas paulistas obtiveram aumento de produção em um grande crescimento da produção em São Paulo, que superou a hegemonia produtiva do Nordeste no início da década de 50. E após a II Guerra Mundial, a indústria açucareira brasileira focou na multiplicação da capacidade produtiva, não havendo uma importância a eficiência devido às vastas terras e clima favorável. Contudo, as variações no preço internacional do açúcar e a obsolescência das usinas forçaram uma mudança de atitude. Em 1959, produtores paulistas formaram a COPERSUCAR para defender preços e buscar novas tecnologias, inspiradas em modelos como os da Austrália e África do Sul, que introduziram inovações nos equipamentos (FIOMARI, 2004).

Retornando para a década de 1880, com o objetivo de aumentar a produtividade, a resistência e a adaptação climática foi iniciado as tentativas de hibridização entre *S. officinarum* e outras espécie e desta maneira, o processo de "nobilização" envolveu o cruzamento da cana nobre com outras espécies a fim de infundir resistência a doenças e pragas, mantendo um alto teor de sacarose. No Quadro 1, ilustra-se as principais características de cada espécie (RHUM AGRICOLE, 2025).

Quadro 1 – Espécies da cana de açúcar.

Espécie	Origem Principal	Teor de Sacarose	Teor de Fibra	Resistência a Doenças	Vigor	Usos Históricos Principais
<i>Saccharum officinarum</i>	Pacífico Sul	Alto	Baixo	Baixa	Alto	Produção de açúcar, mastigação
<i>Saccharum robustum</i>	Nova Guiné	Médio	Alto	Baixa	Alto	Possível ancestral da <i>S. officinarum</i> , construção inicial
<i>Saccharum spontaneum</i>	Norte da Índia	Baixo	Alto	Alta	Alto	Melhoramento genético (resistência)
<i>Saccharum barberi</i>	Índia	Médio	Médio	Média	Médio	Produção de açúcar em regiões temperadas
<i>Saccharum sinense</i>	China	Médio	Médio	Média	Médio	Produção de açúcar em regiões temperadas
<i>Saccharum edule</i>	Nova Guiné	Baixo	Alto	N/A	Médio	Folhas comestíveis

Fonte: (RHUM AGRICOLE, 2025)

O melhoramento genético aumentou significativamente a produtividade da cana de açúcar no Brasil, com um aumento de mais de 50% nos últimos 30 anos devido a novas variedades (RHUM AGRICOLE, 2025).

Considerando, o contexto histórico na Quadro 2, ilustra-se a cronologia resumida do processo de disseminação da cana de açúcar.

Quadro 2 – Cronograma da disseminação da cana de açúcar.

Período Aproximado	Evento Principal	Região Principal
8000-10000 atrás	Domesticação da cana de açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	Nova Guiné
3000 anos atrás	Primeiras evidências de produção de açúcar a partir da cana	Índia
710 d.C.	Desenvolvimento de técnicas de clarificação, cristalização e refino do açúcar	Egito
1100-1500 d.C.	Disseminação do cultivo e produção de açúcar pelo mundo árabe e Mediterrâneo	Oriente Médio, Norte da África, Sul da Europa
1425 d.C.	Introdução da cana de açúcar na Madeira	Madeira
1493 d.C.	Introdução da cana de açúcar no Caribe por Cristóvão Colombo	Caribe
1532 d.C.	Introdução oficial da cana de açúcar no Brasil	Brasil
Final do séc. XIX	Início dos esforços sistemáticos de melhoramento genético da cana de açúcar	Java, Barbados, Índia
Século XXI	Continuação do melhoramento genético e expansão para a produção de biocombustíveis	Global

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 O PROGRAMA NACIONAL DO ÁLCOOL (PROÁLCOOL)

A criação do Proálcool está ligada ao caótico cenário energético global da década de 1970, sendo o primeiro choque ocorrendo, em 1973, com os aumentos subsequentes nos preços do barril de petróleo, e tal situação destacou uma vulnerabilidade das nações consumidoras. O Brasil se encontrou em uma posição crítica, pois como o modelo de desenvolvimento tinha como prioridade o transporte rodoviário, esta era responsável por 41% do consumo, e o país importava cerca de 80% do óleo combustível que consumia e esta dependência externa colocava o Brasil em vulnerabilidade diante das oscilações no mercado internacional de petróleo. A partir de 1974, o Brasil passou a registrar déficits constantes e elevados na balança comercial, impulsionados pela explosão da fatura petrolífera, fazendo com que o crescimento da dívida externa brasileira ocorresse de forma acelerada, sendo uma das mais elevadas do mundo no início dos anos 80. Nesse contexto de estrangulamento externo e crescente preocupação com a segurança do abastecimento, o governo militar da época buscou respostas estratégicas para reduzir a dependência energética e mitigar os impactos macroeconômicos adversos (AGENCIA FAPESP, 2016).

O Programa Nacional do Álcool, conhecido como Proálcool, representa um marco fundamental na história econômica, energética e social do Brasil sendo oficializado em 14 de novembro de 1975, por meio do Decreto nº 76.593 1, o este programa surgiu como uma resposta à crise global do petróleo que abalava as economias mundiais (FIOMARI, 2004).

Sua definição inicial era instituir um programa nacional para atender às necessidades do mercado interno e externo de álcool e, crucialmente, servir à política de combustíveis automotivos do país, reduzindo a dependência brasileira do petróleo importado, assim o programa expandiu a cultura da cana de açúcar, principalmente do Sudeste devido às condições naturais da região, incentivando as usinas de açúcar também a produzirem álcool e sendo fundamental estímulo para o consumo de álcool em veículos, podendo ser de maneira pura ou misturada à gasolina. Considerando em termos históricos, o programa auxiliou para a garantia do suprimento de álcool para o mercado interno e externo; integrar o álcool à política nacional de combustíveis automotivos; estimular a produção de álcool a partir de diversas matérias-primas (cana-de-açúcar, mandioca, etc.), com ênfase na expansão da produção agrícola; modernizar e aumentar a capacidade das destilarias já existentes e promover a instalação de novas unidades produtoras, sejam elas anexas a usinas de açúcar ou autônomas (FIOMARI, 2004).

A evolução ao longo de quase cinco décadas do programa foi marcada por ciclos

alternando períodos de crescimento com fases de profunda crise e posterior readaptação, refletindo as dinâmicas da economia global, as mudanças na política interna e a própria capacidade de resposta do setor e na Quadro 3, ilustra-se estes ciclos (PRÓALCOOL... 2012).

Quadro 3 – Fases do programa Proálcool

Fase	Contexto Principal	Foco do Programa	Principais Resultados/Eventos
Expansão Moderada (1975-1979)	1º Choque do Petróleo (1973); Necessidade de reduzir importações	Produção de álcool anidro para mistura na gasolina	Início da estruturação do programa; Incentivos governamentais iniciais; Aumento da produção de anidro.
Expansão Acelerada (1980-1985)	2º Choque do Petróleo (1979); Altos preços do petróleo	Produção de álcool hidratado; Veículos a álcool puro	Forte estímulo à produção e consumo de hidratado; Grande adesão de consumidores e indústria automotiva; Carros a álcool dominam vendas (76% em 1986).
Desaceleração e Crise (1986-1990/1995)	Queda do preço do petróleo ("contrachoque"); Problemas de gestão; Plano Cruzado	Redução de incentivos; Desequilíbrio oferta/demanda	Crise de abastecimento de álcool (final dos anos 80); Perda de confiança do consumidor; Queda drástica nas vendas de carros a álcool (0,1% em 1998).
Desregulamentação e Reestruturação (Década de 1990)	Fim do regime militar; Políticas neoliberais; Extinção do IAA (1990)	Maior orientação para o mercado; Fim do intervencionismo forte	Setor sucroenergético busca reestruturação produtiva e de mercado por conta própria; Período de dificuldades e incertezas.
Ressurreição com o Carro Flex (A partir de 2003)	Lançamento da tecnologia flex-fuel (2003)	Etanol como opção competitiva à gasolina	Rápida adoção dos veículos flex; Recuperação da demanda por etanol; Novo ciclo de crescimento do setor; Mitigação do risco de desabastecimento.

Fonte: (PRÓALCOOL... 2012)

Estimativas recentes indicam que, ao longo de suas quase cinco décadas, o Proálcool permitiu ao Brasil economizar o equivalente a mais de 2,5 bilhões de barris de petróleo, resultando em uma economia de aproximadamente 205 bilhões de dólares em importações de gasolina, indicando que a substituição foi essencial para diminuição da vulnerabilidade externa do país, com a dependência do petróleo importado caindo de mais de 80% na época da criação do programa para cerca de 18% em 2013. O setor sucroenergético consolidou-se

como um pilar importante da economia brasileira, contribuindo no Produto Interno Bruto (PIB), isto considerando dados de 2021, cerca de 3,5% no PIB agrícola e 1,2% no PIB industrial. Em 2020, o complexo açúcar-etanol foi responsável por 9,9% das exportações totais do agronegócio brasileiro (equivalente a US\$ 9,9 bilhões), posicionando-se como o quarto setor mais representativo. Essa trajetória de desenvolvimento consolidou o Brasil como líder global na produção e uso de etanol combustível, sendo o segundo maior produtor mundial de etanol e o maior produtor de açúcar em 2020 (BRASIL... 2025).

Baseado no legado do Proálcool, em 2017, foi implementado a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576 e este plano representa a evolução e modernização da abordagem brasileira aos biocombustíveis e seus objetivos estão alinhados com cumprimento das metas de redução de emissões assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris, a fim de promover a expansão contínua e sustentável dos biocombustíveis na matriz energética, induzindo ganhos de eficiência energética e redução de emissões de GEE. O programa baseia-se em um sistema de metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis e na criação de Créditos de Descarbonização (CBIOS) e para cada crédito deste representa uma tonelada de CO₂ equivalente que deixou de ser emitida pela substituição de combustível fóssil por biocombustível. Assim, os produtores de biocombustíveis comprovam maior eficiência ambiental com as suas atividades produtivas e como consequência da menor emissão de GEE, recebem mais CBIOS. E como parte do mercado, tais créditos podem ser comercializados em bolsa, e os distribuidores de combustíveis fósseis são obrigados a comprar CBIOS para cumprir suas metas de descarbonização, tornando o CBIOS um mecanismo de incentivo econômico para a produção de biocombustíveis. Diante disto, o RenovaBio incorpora os pontos positivos do Proálcool e coloca a sustentabilidade e a redução de emissões em um patamar de destaque, auxiliando na crescente atendimento para um futuro mais limpo e sustentável (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025).

3 PROCESSO INDUSTRIAL DE UMA USINA SUCROENERGÉTICA

Nesta seção, o assunto discorrido se refere ao fluxo do processo industrial de uma usina sucroalcooleira, destacando a cogeração e os componentes em uma geração de energia elétrica a partir da biomassa. Foi utilizado como modelo a unidade sucroalcooleira Atvos Bioenergia Conquista do Pontal.

3.1 COGERAÇÃO

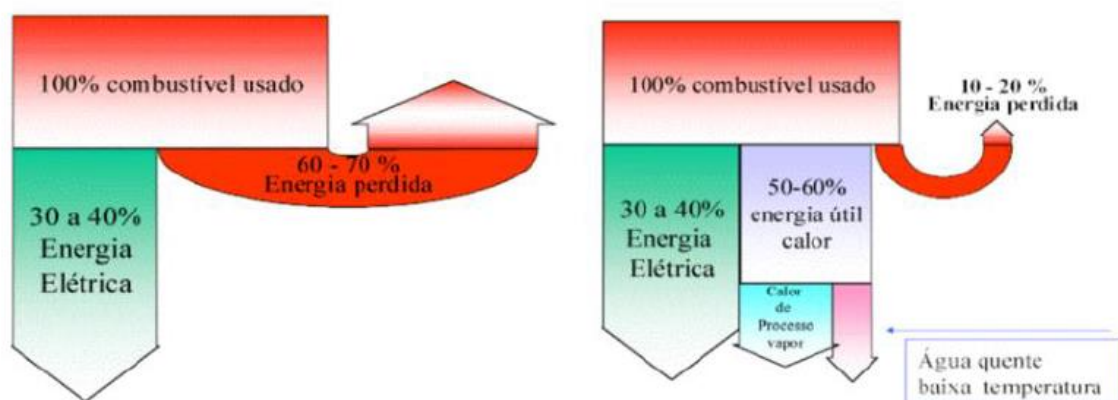
O conceito de cogeração já existia no século XIX, em que as indústrias na Europa já empregavam o calor residual de termelétricas para diversas finalidades e nos Estados Unidos, a cogeração chegou a corresponder a aproximadamente 50% da produção de energia em 1900. Porém, com a expansão das centrais termelétricas e o desenvolvimento de redes de distribuição centralizadas levaram a uma diminuição acentuada da participação da cogeração, que caiu para menos de 4% até 1970. O cenário começou a passar um uma reversão de tendência com a crise energética nesta mesma década, que serviu de foco retomada do uso e desenvolvimento da cogeração nas nações industrializadas para garantir um uso mais eficiente da energia. A trajetória histórica da cogeração que a ela foi fortemente influenciada por fatores econômicos e regulatórios, porém, atualmente, esta prática é adotada globalmente como um método eficaz para o uso eficiente da energia (MOREIRA, 2018).

No Brasil, cerca de 80% do consumo total de energia de uma indústria, é de origem térmico e o restante de elétrico, indicando que há uma importância do desenvolvimento de tecnologias para reaproveitamento de calor residual nos processos industriais, como a cogeração e é conhecida como Produção Combinada de Calor e Energia (CHP, do inglês *Combined Heat and Power*), sendo um processo termodinâmico que se caracteriza pela geração simultânea e sequencial de eletricidade e calor útil proveniente uma única fonte de combustível. O propósito central dessa técnica é maximizar a extração de energia contida no combustível a fim de ter uma utilização estratégica e sequencial do calor, conforme ilustrado na Figura 9 (POTENCIALIZEE, 2023).

Esta prática pode ser classificada como o *topping* e o *bottoming*, estes exibidos na Figura 10 e no primeiro ciclo, ele é o mais utilizado sobretudo no setor sucroalcooleiro, pois com a queima da biomassa, que é o bagaço de cana, a fonte primária de energia para este setor, é gerado o vapor superaquecido nas caldeiras e o vapor é fornecido aos turbogeradores

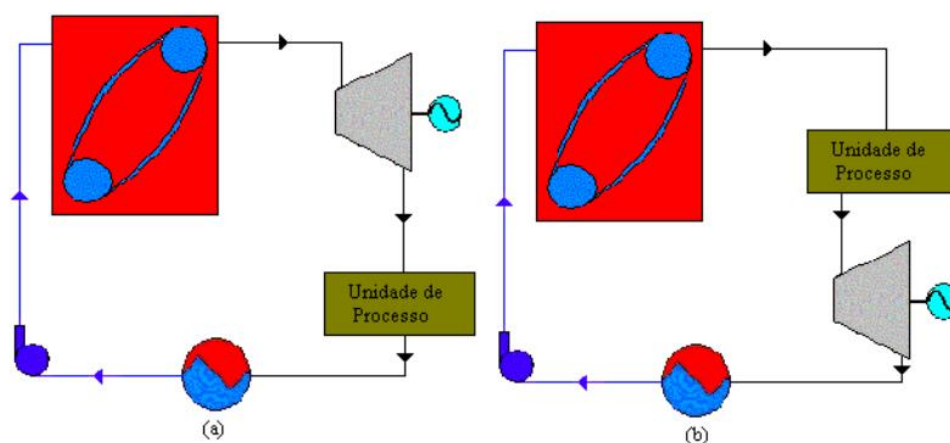
e a outros acionamentos mecânicos com turbinas como bombas, moendas e desfibradores e o vapor na exaustão das turbinas, chamado de “vapor de escape”, é usado como reservatório térmico no processamento do caldo de cana, pois a energia interna do vapor ainda tem possibilidade de gerar trabalho. Por outro lado, nos ciclos *bottoming*, a energia térmica residual proveniente de processos industriais a altas temperaturas é utilizada para gerar energia elétrica, sendo uma situação encontrada em indústrias químicas (POTENCIALIZEE, 2023).

Figura 9 – Cogeração, exemplo.



Fonte: (POTENCIALIZEE, 2023).

Figura 10 – Cogeração, *topping* (a) e *bottoming* (b).



Fonte: (FIOMARI, 2004).

A compreensão dos princípios termodinâmicos é a base do estudo da eficiência e as vantagens da cogeração, pois estes estabelecem os limites para o desempenho dos sistemas

energéticos e desta maneira, para a compreensão da produção de eletricidade a partir de combustíveis como a biomassa, segue uma sequência definida de conversões de energia, passando pela reação química de combustão do combustível libera calor, e este é transformado em energia mecânica por uma máquina térmica, e, por fim, essa energia mecânica é convertida em energia elétrica por um gerador. A realização de balanços de energia em sistemas de cogeração se baseia no princípio da conservação da energia, Primeira Lei da Termodinâmica, ou seja, a energia total do sistema se mantenha constante, exceto pelas transferências de entradas e saídas de energia. Assim, para validar a eficiência de uma máquina térmica (η), seu cálculo se baseia em uma razão, conforme ilustrado na expressão 1 em que o trabalho líquido gerado é W , o calor fornecido (Q_H) e o calor perdido é (Q_L) (MOREIRA, 2018).

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} \quad (1)$$

Para complementar a primeira lei da termodinâmica para avaliar o potencial útil da energia em sistemas de cogeração, especialmente o calor rejeitado, deve-se relacionar com a segunda lei da termodinâmica e com o conceito de exergia, pois mesmo que um joule de calor em alta temperatura possui um potencial maior de ser convertido em trabalho do que um joule de calor em baixa temperatura, e com apenas a Primeira Lei, as duas situações são definidas como equivalentes. Porém com a Segunda Lei da termodinâmica, esta estabelece que nem todo o calor fornecido a uma máquina térmica pode ser convertido em trabalho útil; uma parte sempre será rejeitada para uma fonte fria, e desta forma a eficiência máxima teórica para uma máquina térmica operando entre duas temperaturas, T_q (fonte quente) e T_f (fonte fria), é dada pela Eficiência de Carnot como na expressão 2 (MOREIRA, 2018).

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (2)$$

Ao aproveitar o calor rejeitado que, pela Segunda Lei, possui um baixo potencial para ser convertido em trabalho adicional, a cogeração eleva a eficiência global do sistema e assim, o conceito de exergia torna-se importante como uma ferramenta termodinâmica que oferece uma avaliação mais profunda do potencial de trabalho da energia. Por definição a exergia é definida como o trabalho teórico máximo que um sistema pode produzir ao interagir com um

ambiente de referência (conhecido como "estado morto") até atingir o equilíbrio termodinâmico, sendo uma medida da qualidade da energia que indica a capacidade de ser convertida em outras formas de energia. No Quadro 4, ilustra-se os conceitos básicos da exergia (EXERGIA, 2025).

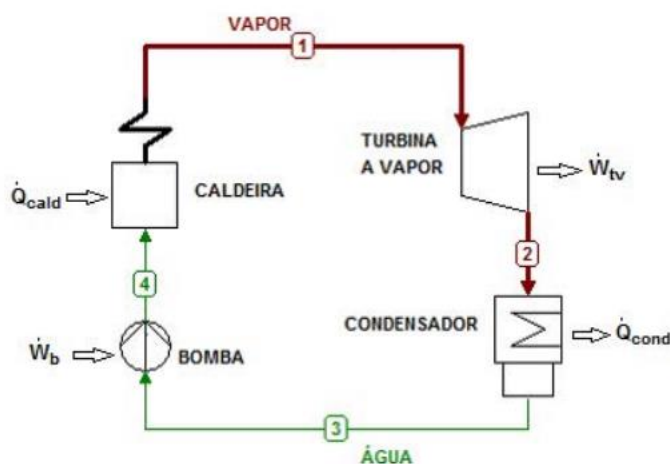
Quadro 4 – Conceitos referentes à exergia

Conceito	Descritivo
Trabalho Teórico Máximo	Representa o maior trabalho útil que pode ser obtido de um sistema à medida que ele se move em direção ao equilíbrio com suas vizinhanças. É o limite máximo de trabalho que um sistema é capaz de gerar.
Qualidade da Energia	A exergia está diretamente relacionada à qualidade da energia. A qualidade de uma fonte de calor depende criticamente de sua temperatura, ou seja quanto maior a temperatura, maior sua exergia e potencial de trabalho.
Interação com o Ambiente	A exergia é determinada pela interação entre um sistema e seu ambiente. O ambiente é considerado um sistema idealizado e grande o suficiente para que suas propriedades (temperatura, pressão) não sejam afetadas pelos processos que ocorrem no sistema
Estado Morto	É o estado de equilíbrio termodinâmico do sistema com o ambiente. Neste ponto, não há mais potencial para a realização de trabalho, e a exergia é zero, mesmo que o sistema e o ambiente ainda possuam energia.
Não Conservada	Ao contrário da energia, a exergia não é conservada; ela é destruída por irreversibilidades dentro de um processo, como atrito, transferência de calor através de diferenças finitas de temperatura, reações químicas não ideais e mistura de substâncias.
Valores Não Negativos	A exergia não pode ter valores negativos. Uma diferença de potencial para realizar trabalho útil sempre implica que a exergia é sempre positivos.

Fonte: (EXERGIA, 2025)

Com os conceitos termodinâmicos, define-se os ciclos termodinâmicos empregados em termoelétricas e nelas são empregadas o Ciclo Rankine Convencional (CRC) e é um ciclo termodinâmico fechado amplamente empregado para gerar vapor utilizando água como fluido de trabalho, que aciona uma turbina a vapor conectada a um gerador elétrico e este processo envolve o aquecimento da água em uma caldeira até que se transforme em vapor saturado ou superaquecido que se expande através de uma turbina, gerando trabalho. O vapor é condensado e a água resultante é bombeada de volta à caldeira, reiniciando o ciclo com uma eficiência térmica total do CRC variando entre 21% e 24%. Na Figura 11, ilustra-se o diagrama deste ciclo (ZANICHELLI, 2024).

Figura 11 – Ciclo Rankine Convencional (CRC).



Fonte: (ZANICHELLI, 2024).

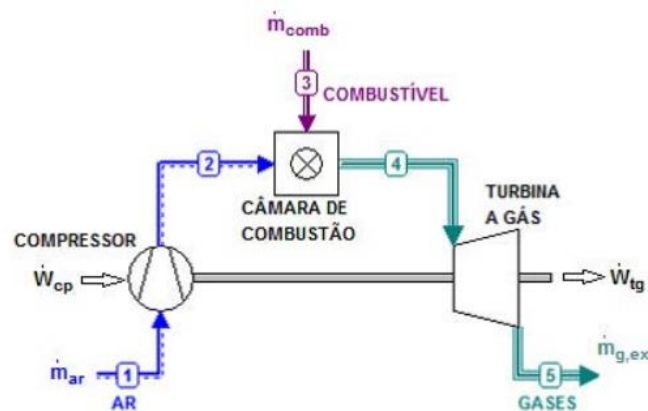
Há o ciclo Rankine Orgânico (ORC) funciona com mesmo princípio do CRC, mas utiliza fluidos orgânicos com baixas temperaturas de ebulição em vez de água e esta característica é particularmente vantajosa para a geração de trabalho em expansores a partir de fontes de calor de baixa temperatura, como calor residual industrial, energia geotérmica ou solar (ZANICHELLI, 2024).

O Ciclo Brayton é a base de funcionamento das turbinas a gás, como um motor de combustão interna sendo um conjunto de componentes como um compressor, uma câmara de combustão e a turbina. Essas máquinas são versáteis, podendo queimar tanto combustíveis líquidos quanto gasosos, utilizando o ar como fluido de trabalho e Na Figura 12, ilustra o seu esquema de funcionamento (ZANICHELLI, 2024).

O ciclo por ser combinado é quando dois ou mais ciclos são arranjos de forma a

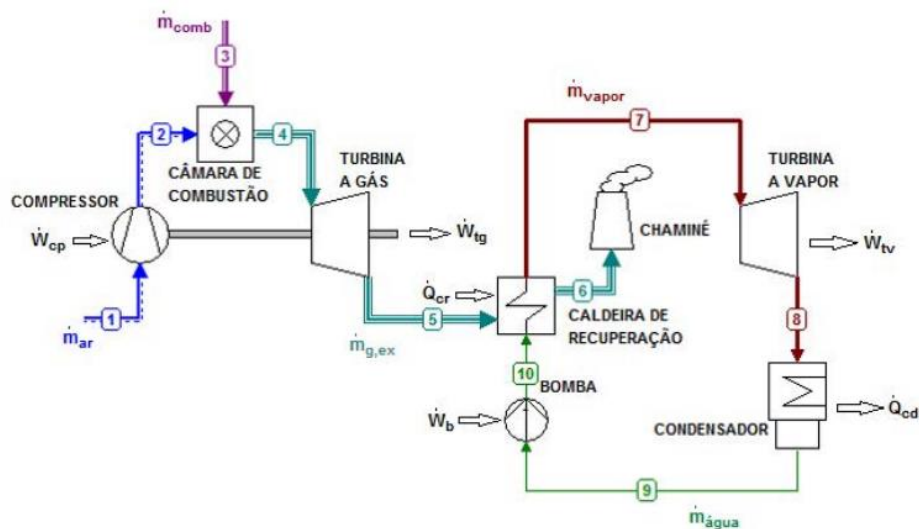
operar em conjunto com principal objetivo o aumento do rendimento global da planta. A configuração mais utilizada é a combinação do ciclo Brayton como unidade superior topping com o ciclo Rankine como unidade inferior bottoming em que os gases de exaustão de uma turbina a gás são usados como fonte de calor para o ciclo de potência a vapor. Em seguida, esses gases são conduzidos da turbina a gás para uma caldeira de recuperação, para que seja transferida a energia térmica para o outro fluido de trabalho. Na Figura 13, ilustra-se o esquema de um ciclo combinado (ZANICHELLI, 2024).

Figura 12 – Ciclo de Brayton.



Fonte: (ZANICHELLI, 2024).

Figura 13 – Ciclo combinado.



Fonte: (ZANICHELLI, 2024).

O setor sucroenergético brasileiro é um exemplo da aplicação bem-sucedida da cogeração, principalmente a baseada no ciclo de Rankine, e utilizando o bagaço da cana-de-açúcar como principal fonte de combustível para gerar eletricidade e calor para seus processos.

3.2 PROCESSO INDUSTRIAL DE UMA USINA SUCROENERGÉTICA

Atualmente, as indústrias têm a necessidade de garantir que a fluidez, otimização e redução de custos nos seus procedimentos industriais a fim de programar e prever os processos mecânicos, físicos, elétricos e químicos responsáveis pela transformação da matéria prima do seu estado bruto até o produto final. Desta maneira, o processo industrial pode-se ser definido por etapas, sendo elas a recepção de matéria prima, tratamento e transformação, concepção do produto e despacho. Na Figura 14, ilustra-se o fluxo simplificado deste processo (SEBRAE, 2023).

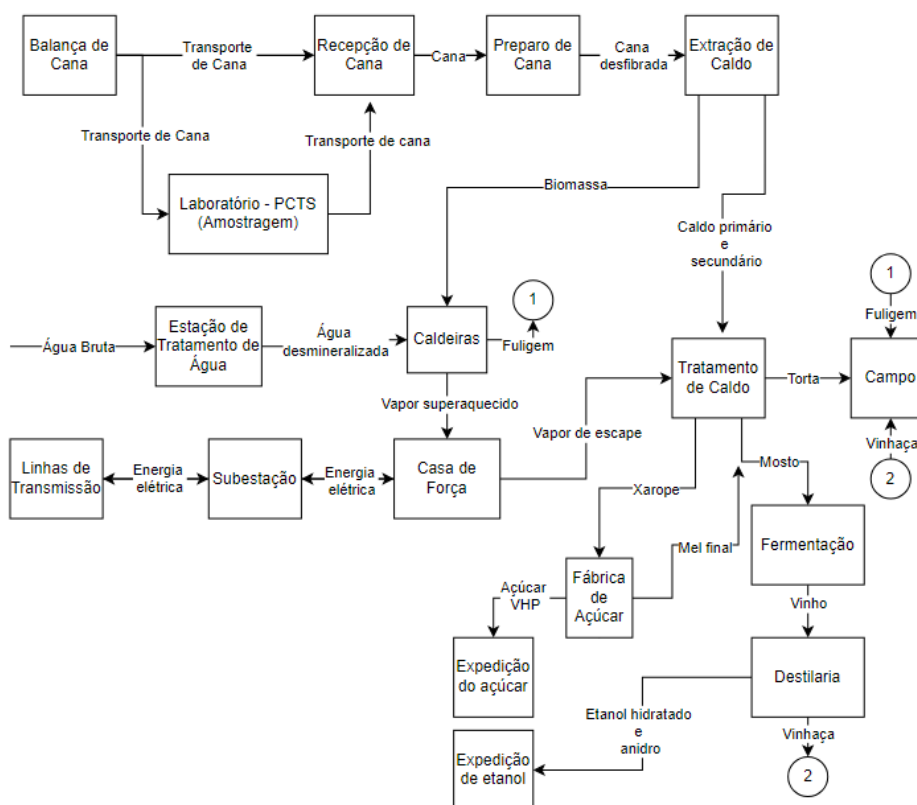
Figura 14 – Processo - Fluxo.



Fonte: (SEBRAE, 2023).

Com o foco na indústria sucroenergética, este setor se refere as instalações que produzem açúcar e álcool, sendo este possuindo duas variações básicas, que são o hidratado, usado como combustível e o anidro que é destinado para ser utilizado como aditivo na gasolina. Outros ramos como a indústria farmacêutica ou química também utilizam este recurso. Com relação ao açúcar, além do destino na indústria alimentícia, ele também está presente na construção civil, melhorando a capacidade de absorção de deformações de origens térmicas na argamassa (PANORAMA... 2023).

Assim, ao introduzir os conceitos de cogeração, o entendimento do processo industrial é importante para compreender a aplicação e os impactos na produção e manutenção da implementação de turbogeradores e de como desde a chegada de cana de açúcar, até o consumo de bagaço na sua queima são importantes para geração do produto final. Na Figura 15, ilustra-se o fluxograma macro da indústria sucroenergética.

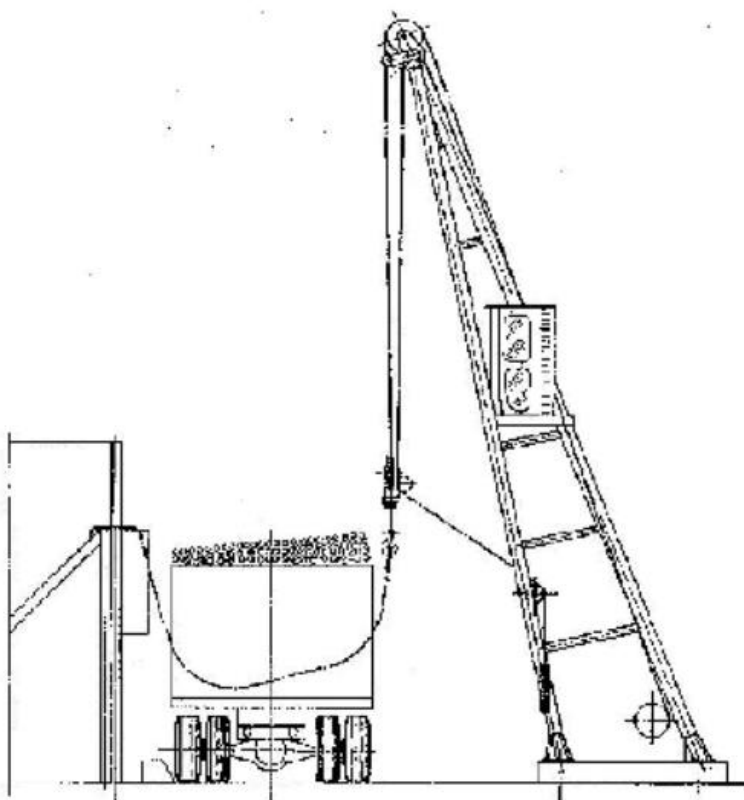
Figura 15 – Processo da usina sucroalcooleira.

Fonte: Elaborado pelo autor.

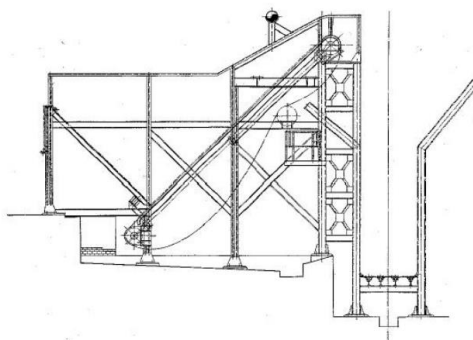
Considerando a Figura 15, com o macroprocesso industrial e baseado na oportunidade de trabalho na Atvos Bioenergia Conquista do Pontal (UCP), verifica-se que para o entendimento das proteções e controle de turbogeradores, o entendimento do processo de cada setor ou etapa industrial complementa a compreensão dos métodos de operação e manutenção aplicados nos turbogeradores. Assim, inicialmente, o processo de açúcar e etanol inicia com a cana de açúcar proveniente do campo chega até a usina em caminhões, mais conhecido como treminhões, que são carregados de cana e ao chegarem na usina se alocam primeiramente no pátio externo, para então se encaminharem a balança onde é realizada a pesagem antes e depois do descarregamento. Após a pesagem, uma parte dos caminhões são sorteados para ser feita a análise de qualidade da matéria-prima recebida. Para retirar as amostras de cana utiliza-se uma sonda oblíqua, que retira duas amostras de pontos diferentes da carga, com aproximadamente 10 Kg cada. O nível e o local de retirada são controlados pelo operador no laboratório que verifica com auxílio de uma câmera a situação em que se encontra a carga. Em seguida, a forrageira recebe essa amostra de cana, e ela será picada e desfibrada, simulando com certo grau de equivalência o preparo de cana que é feito na moenda, e então

encaminhada a uma betoneira para homogeneização de toda a amostra. Essa amostra agora é encaminhada em outro setor do laboratório PCTS, onde será prensada em uma prensa hidráulica de 250 Kgf/cm² por 1 minuto. A partir da prensa temos a Fibra, que será pesada para se obter o peso de bolo úmido (PBU), e o caldo, onde são feitas as análises de Brix e Pol em um equipamento de análise comparativa. O Brix é a porcentagem de sólidos solúveis em solução açucarada a 20°C, e sua análise é feita a partir do índice de refração da luz em um refratômetro. A Pol é a porcentagem de sacarose aparente contida em uma solução açucarada, determinada pelo desvio da luz polarizada e para esta medição o caldo é clarificado com solução de Octapol e em seguida filtrado em um filtro de papel, para então ser realizada a análise de Pol em um sacarímetro. A partir desta etapa, os treminhões são direcionados para os hilos e eles são guindastes responsáveis por realizar o tombamento das cargas nas mesas alimentadoras e em UCP possui dois hilos, sendo utilizado um deles que tomba a carga para uma mesa alimentadora de 45° e conforme o aumento de cana a ser processada, é liberado o segundo hilo, sendo este responsável por tombar em uma esteira metálica de capacidade menor. Na Figura 16, ilustra-se um desenho do funcionamento do Hilo e na Figura 17, o esquema de uma mesa alimentadora 45° (CURSO... 1999).

Figura 16 – Hilo



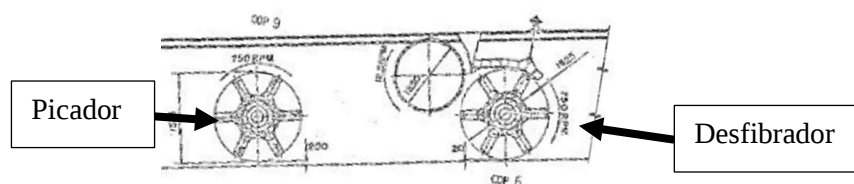
Fonte: (CURSO... 1999).

Figura 17 – Mesa alimentadora

Fonte: (CURSO... 1999).

Como há impurezas na recepção da cana, há um sistema que consiste em separar as impurezas por diferença de densidade, que é o sistema de ventiladores que empurram a palha e terra para uma esteira e a cana por ser mais densa, acaba caindo na esteira metálica do preparo de cana. A mesa alimentadora também possui diversos furos por onde a terra é peneirada e encaminhada para a moega, que após cheia, é descarregada em caminhões. A palha e terra retirados pelos ventiladores são transportados a uma peneira rotativa, que irá retirar ainda o resto de terra presente sendo direcionada para a moega e a palha separada, passa por um conjunto de facas e direcionada para a esteira de biomassa para ser usada como combustível nas caldeiras (CURSO... 1999).

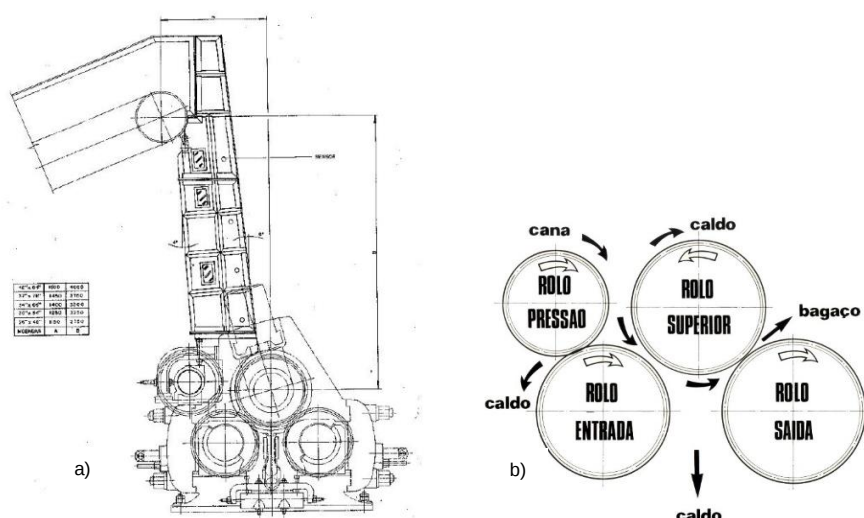
Seguindo o processo, a cana proveniente da mesa para passar no conjunto de picador, desfibrador e espalhador. O picador é alimentado por motor elétrico de 5000cv e gira no sentido de rotação da esteira e é composto por facas que irão picar a cana, facilitando a alimentação do desfibrador e este completa o preparo da cana rompendo a maior quantidade possível de células, girando no sentido contrário de rotação da esteira e realiza o desfibramento ao esfregar a cana contra uma placa desfibradora. Em UCP, são dois motores um de 4200cv e outro de 3150cv. Na Figura 18, ilustra-se um esquema deste processo. A última etapa é a passagem por um eletroímã que retira peças metálicas estranhas que podem danificar os rolos das moendas e atrapalhar o processo (CURSO... 1999).

Figura 18 – Preparo de Cana.

Fonte: (CURSO... 1999).

A extração de caldo é a próxima etapa e ela é realizada em um conjunto de 6 ternos que são compostos por 4 rolos, sendo o de Pressão que se encontra na parte superior do termo logo acima do rolo inferior de entrada e sua função é compactar a camada de cana permitindo uma melhor alimentação do termo. Há o rolo superior que está localizado na parte superior do castelo, entre o rolo de entrada e o rolo de saída, gira no sentido anti-horário e como ele tem o maior contato com a cana, é responsável pela extração do caldo da biomassa. Por fim, há os rolos inferiores que cada terno de moenda possui 2, um de entrada e outro de saída, e a função do de entrada é fazer uma pequena extração de caldo e direcionar a cana na abertura de saída. Para melhorar a aderência da cana e assim aumentar a eficiência da moagem, é realizado o “chapisco” que seria a soldagem dos frisos nos rolos. Na Figura 19, ilustra-se o esquema do terno (CURSO... 1999).

Figura 19 – Terno de moenda (a) e Rolos (b).



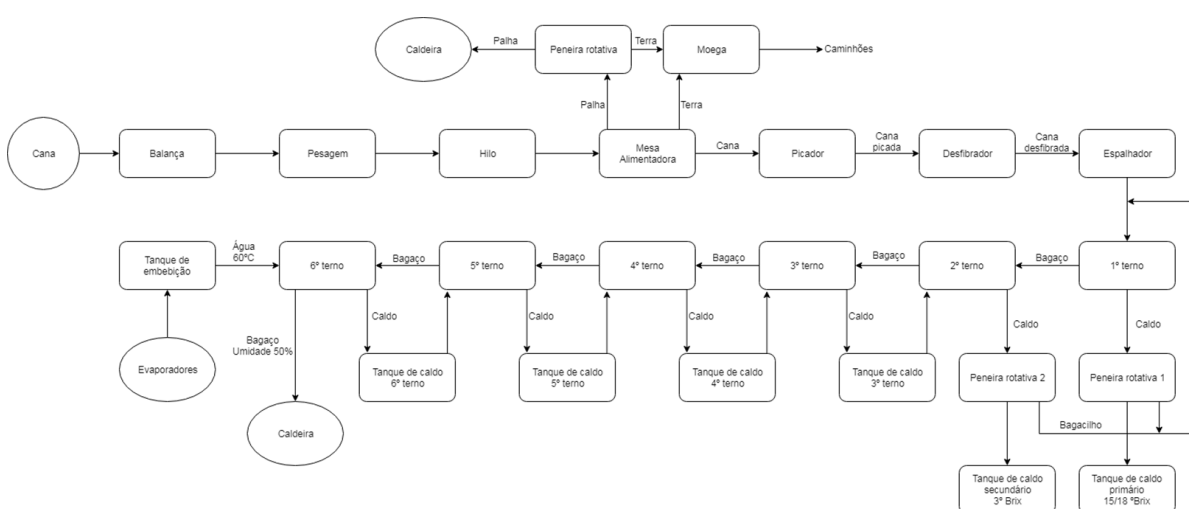
Fonte: (CURSO... 1999).

Em UCP, tem-se um conjunto de 6 ternos, no primeiro terno há a alimentação da cana desfibrada, e o caldo extraído nesse terno é chamado de caldo primário, onde não ocorreu nenhuma diluição e extrai-se 75% do caldo presente na cana. A rotação dos rolos depende da altura de cana no *donnelly*, e quando diminui ocorre o aumento da velocidade das esteiras da recepção. Do 2º ao 6º terno é utilizado o sistema de embebição composta, onde água de embebição a 60°C e essa água é adicionada pressurizada no bagaço no 6º terno. Do 6º terno ela é enviada a um tanque intermediário de caldo e então ao 5º terno e assim sucessivamente até o 2º terno onde o caldo é chamado de caldo secundário. Tanto o caldo primário quanto o secundário são enviados a um filtro rotativo que separa o caldo dos bagacilhos restantes que são carregados junto com o caldo. Esse bagacilho retorna para o processo de extração. Em

cada um dos ternos, no rolo superior há a presença de um sensor que lê a altura de cada um dos lados do rolo e para o seu ajuste, utiliza-se bombas hidráulicas que exercem pressão sobre os rolos. Essa altura pode variar de acordo com a carga de cana. A partir do 2º terno de acordo com a altura de carga no *donnelly*, a velocidade do rolo varia para suprir essa altura.

No bagaço que sai no último terno não se adiciona a água de embebição, pois este será direcionado para a caldeira. Esse bagaço sai com a umidade de no máximo 50%, que é o exigido para ser realizada a queima na caldeira. Na Figura 20, ilustra-se o fluxograma do processo da extração de caldo.

Figura 20 – Fluxograma da moenda.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo o processo para a geração de vapor, sendo composta por caldeiras seguido o ciclo termodinâmico de Rankine, como ilustrado na Figura 11, e por esteiras de biomassa que conduzem o bagaço para serem utilizados como combustível ou serem armazenados como reserva energética. Em UCP, há duas caldeiras, uma do tipo grelha rotativa e outra do tipo *pin-hole*. A caldeira 1 de grelha rotativa conta com uma capacidade de 230 ton/h, onde as cinzas caem sobre essa grelha que gira em uma rotação baixa, demorando 8 horas para dar uma volta completa. A caldeira 2 é do tipo *pin-hole*, onde o fundo é levemente inclinado e possui canaletas por onde o ar é soprado, retirando as cinzas. Essa caldeira possui uma capacidade nominal maior de 320 toneladas de bagaço por hora.

O bagaço proveniente da extração do caldo é encaminhado a uma esteira distribuidora que dosa a quantidade de bagaço que vai para cada caldeira e a biomassa segue por canais de alimentação e é distribuído na fornalha pelos espargidores, bocais de ar que possuem um mecanismo de abre e fecha que distribuem uniformemente o combustível. Esses canais de

alimentação devem sempre estar preenchidos por bagaço para garantir a selagem da caldeira. O combustível vai queimando parcialmente ao decorrer da caldeira. Para iniciar o espalhamento e impedir que o bagaço suba para o topo da caldeira é utilizado um ventilador pneumático que injeta ar em temperatura ambiente. O ar aquecido necessário para iniciar a combustão do bagaço é proveniente do conjunto de pré-ares que entra a uma temperatura de aproximadamente 315 °C.

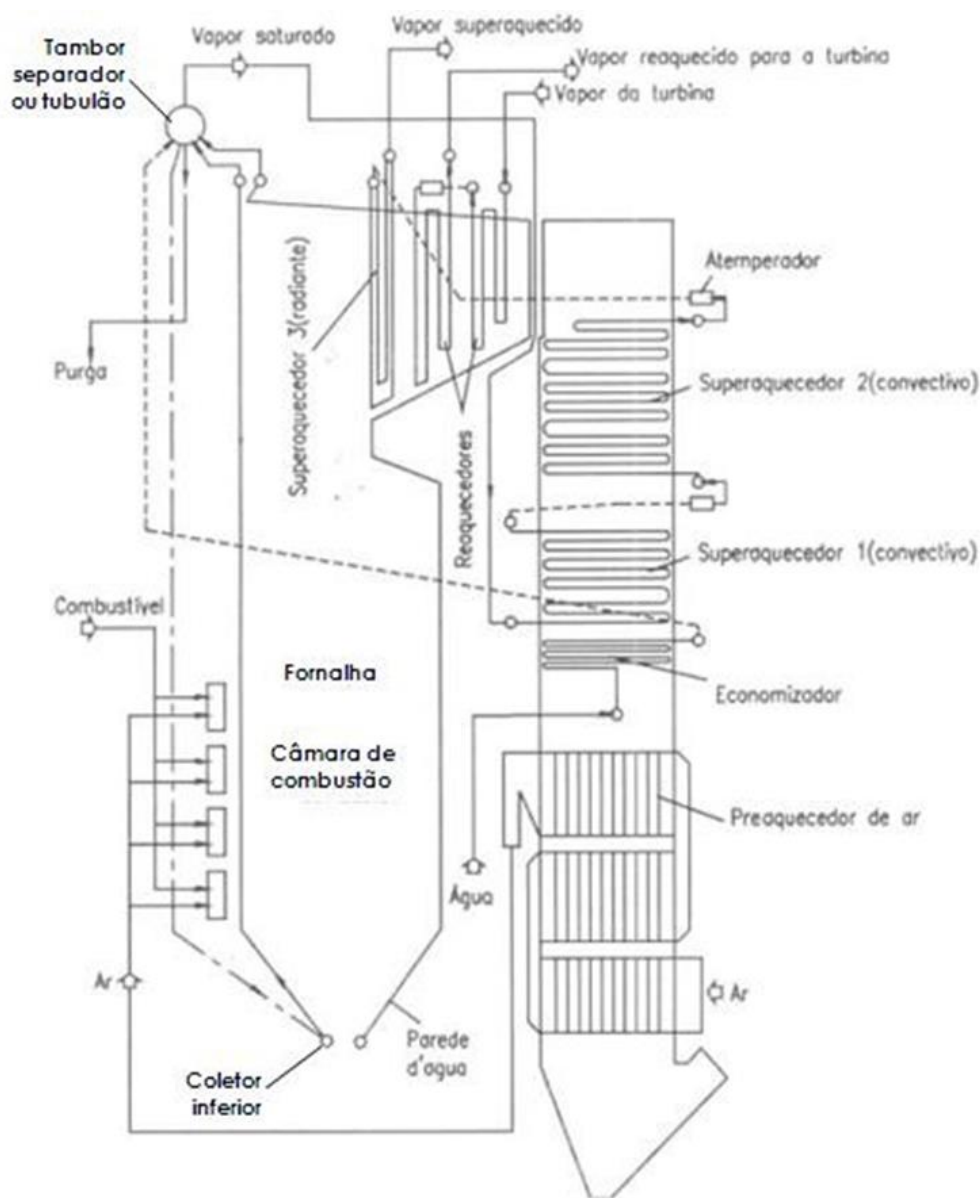
A grelha rotativa gira lentamente para que todo combustível seja consumido e as cinzas vão sendo direcionadas a canaletas. Essas fuligens juntamente com a água de lavagem dos gases são encaminhadas a ETALG.

O ar necessário provém do ventilador de tiragem forçada que aspira o ar do próprio ambiente e antes de entrar na caldeira ele passa pelo conjunto de 3 pré-aquecedores de ar que trocam calor com os gases de combustão provenientes da fornalha, para o mesmo chegar na temperatura correta para a combustão. Ainda existe um sistema de ar secundário que injeta ar de alta pressão, causando turbulência no interior da fornalha e a combustão completa do bagaço. Desta maneira, o caminho dos gases de combustão na caldeira é deixar a fornalha passando pelo superaquecedor (responsável por tornar o vapor superaquecido), economizador 2º (Trocador de calor gás/água), conjunto de 3 pré-aquecedores de ar e o economizador 1º. Depois de trocado o calor em todos esses sistemas, o gás está a uma temperatura de 160 °C e é encaminhado para o lavador de gases, que é instalado por conta da preocupação com os parâmetros ambientais, que controlam a qualidade com que o ar está sendo lançado na atmosfera. No lavador as partículas de sujeira (fuligem) colidem com gotas de água que estão sendo dispersas por sprays, assim essa água suja é encaminhada para a estação de tratamento da água de lavagem dos gases (ETALG) para depois ser reutilizada novamente na lavagem dos gases. Por fim, o gás é expulso pela chaminé a uma altura elevada para que possa ser conduzido de forma natural ao ambiente. Na Figura 21, ilustra-se o esquema de uma caldeira (SANTOS, 2012).

Seguindo o caminho da água que passa dentro das tubulações nas paredes da caldeira, ela deve ser extremamente pura e para isso, é utilizado água desmineralizada proveniente da ETA, assim a primeira etapa é a passagem pelo tanque desaerador que armazena água pura e vapor condensado do processo industrial, e nele é adicionado o sequestrante de oxigênio, regulador de pH e o dispersante. Para aumentar a eficiência e reduzir significativamente o consumo de combustível na caldeira, a água já é previamente aquecida pelo sistema de economizadores 1º e 2º. Esses economizadores nada mais são que trocadores de calor em forma de serpentina, onde a água passa pelos tubos e troca calor com os gases de combustão

aumentando a temperatura da água de entrada e aproveitando diminuindo a temperatura do gás eliminado na atmosfera.

Figura 21 – Esquema de uma caldeira.



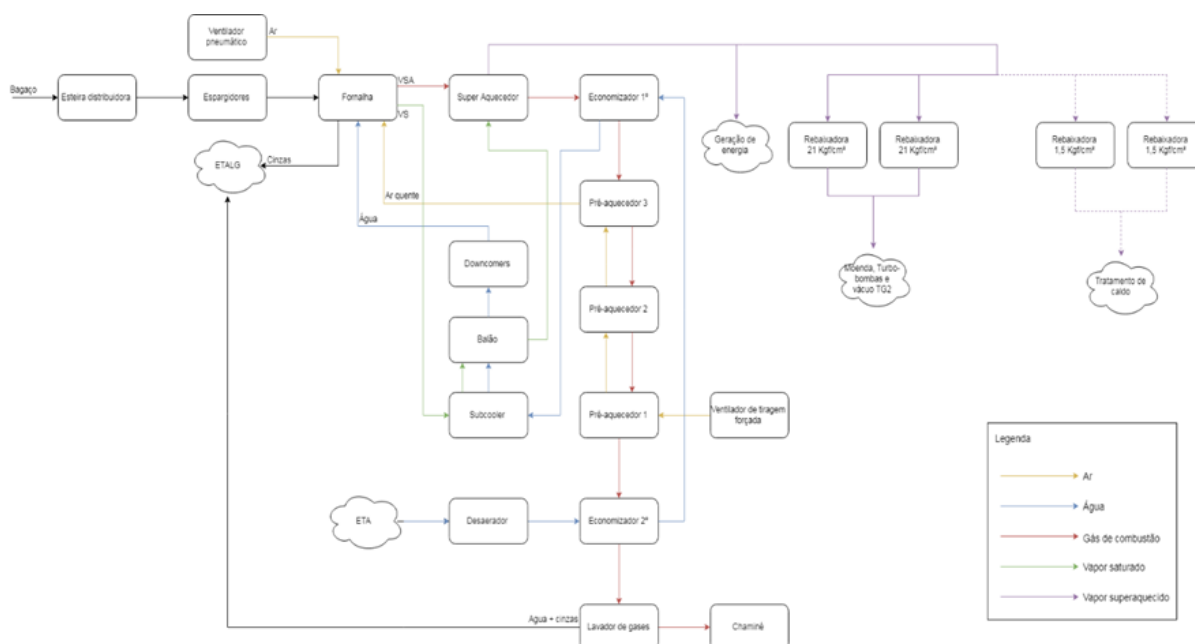
Fonte: (SANTOS, 2012).

Seguindo o caminho da água que passa dentro das tubulações nas paredes da caldeira, ela deve ser extremamente pura e para isso, é utilizado água desmineralizada proveniente da ETA, assim a primeira etapa é a passagem pelo tanque desaerador que armazena água pura e vapor condensado do processo industrial, e nele é adicionado o sequestrante de oxigênio, regulador de pH e o dispersante. Para aumentar a eficiência e reduzir significativamente o consumo de combustível na caldeira, a água já é previamente aquecida pelo sistema de economizadores 1º e 2º. Esses economizadores nada mais são que trocadores de calor em

forma de serpentina, onde a água passa pelos tubos e troca calor com os gases de combustão aumentando a temperatura da água de entrada e aproveitando diminuindo a temperatura do gás eliminado na atmosfera. Dependendo da necessidade essa água ainda passa por um subcooler que é um trocador de calor, que troca calor do vapor saturado que sai da caldeira com a água de alimentação, formando um condensado que pode ser mandado aos superaquecedores. A água então segue para as tubulações no interior do balão (ou tubulão), para então ser direcionada a parede da fornalha por meio dos downcomers e eles são vasos onde a água vinda do topo da caldeira é distribuída pelos diversos nos 4 lados das paredes da fornalha. O vapor saturado formado na fornalha segue para o subcooler para então ser direcionado ao balão que está no topo da caldeira, e esse movimento ocorre simplesmente por ação da densidade. No balão estão presentes tanto o vapor, quanto a água na forma líquida, e para que o vapor saia sem a presença de água têm-se os separadores que permitem a passagem de apenas vapor sem arraste de líquidos. O vapor saturado que sai do balão é encaminhado ao conjunto de tubos na caldeira chamado de superaquecedor. O superaquecedor é constituído de tubos em forma de serpentina onde o vapor circula internamente e os gases de combustão externamente. A partir de agora temos o vapor superaquecido, vapor com a mesma pressão, porém com uma temperatura bem maior e mais seco, em torno de 520°C.

O vapor superaquecido sai com uma pressão de 67 Kgf/cm² e está pronto para ser utilizado na geração de energia nos turbogeradores. Ele também passa por duas rebaixadoras de pressão para 21 Kgf/cm², para ser usado na limpeza da esteira metálica da recepção da cana, uso nas turbobombas e para fazer vácuo de selagem no turbogerador de condensação. A caldeira conta também com duas rebaixadoras de 1,5 Kgf/cm² para o caso de desarme de um dos turbogeradores de contrapressão, seja possível ter vapor para o processo industrial se manter até que seja liberado novamente o turbogerador. Na Figura 22, ilustra-se o fluxograma da geração de vapor.

As caldeiras exigem uma água extremamente pura, para que não ocorra as chamadas incrustações e elas são deposições sobre a camada da tubulação, que provocam uma redução na transferência de calor, afetando a eficiência da caldeira. Outro problema das incrustações são os rompimentos que podem ocorrer na tubulação por conta do aumento da temperatura da superfície, e diminuição o diâmetro da tubulação.

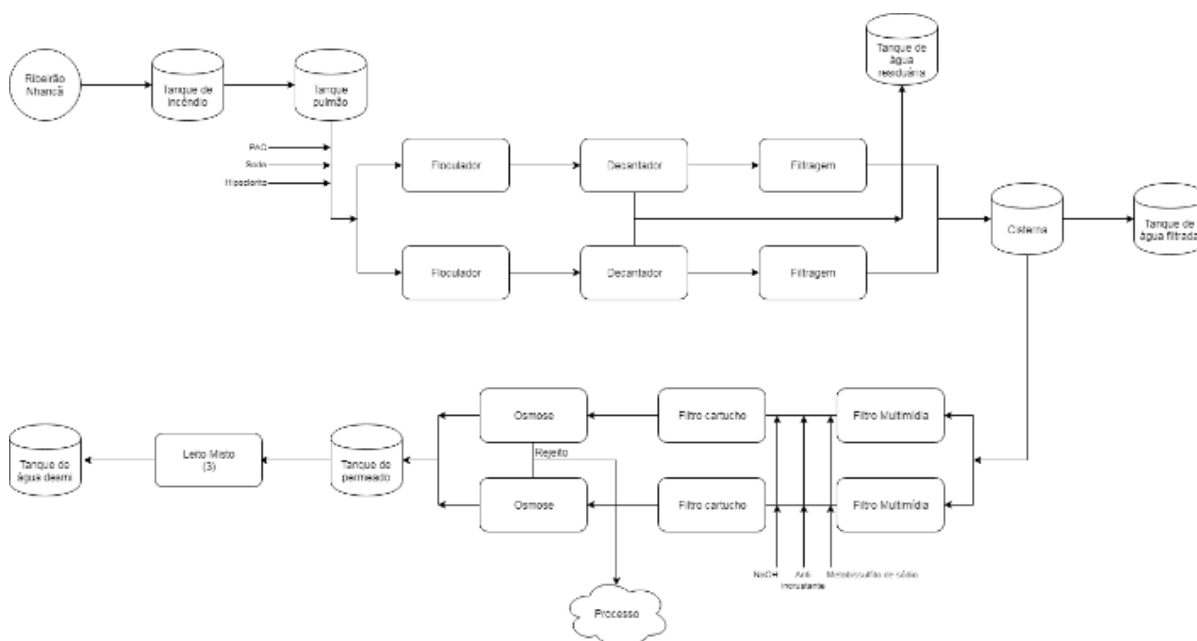
Figura 22 – Fluxograma da geração de vapor

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a água utilizada na ETA, há uma captação de água do rio, e ela abastece um tanque de água de incêndio e posteriormente ao tanque pulmão também chamado de tanque de água industrial, para as posteriores etapas de tratamento. Antes de iniciar o tratamento, os reagentes PAC (Policloreto de alumínio), soda cáustica e cloro (hipoclorito de sódio) são dosados manualmente e respectivamente, a função de cada um deles é primeiramente promover a coagulação e floculação, aglomerando as partículas de sujeira que assim aumentam sua densidade e por gravidade sedimentam, realizar a alcalinização do meio e manter a água no pH desejado (entre 6,5 e 7,0) e aplicar o controle de microrganismos presentes, e oxidação de compostos orgânicos e inorgânicos. Em UCP, há duas ETA's compostas pelo floculador, que conta com um sistema de pás para agitação lenta da água, seguida de um decantador que possui um fundo em forma piramidal, onde o lodo se deposita. O lodo é retirado periodicamente de acordo com indícios de que a sujeira se acumulou e é enviado ao tanque de água residuária. A água limpa sai por calhas no topo e é transferida a um tanque com cascalho/areia/carvão para ser realizada a filtragem. O resultado desta etapa é chamado de água tratada ou clarificada e é enviada a uma cisterna. Para o uso da caldeira, a água tem que ser desmineralizada e este processo inicia com o acréscimo de uma pequena quantidade de PAC na água clarificada e ela passa por um filtro multimídia composto por carvão e algumas camadas de areia, que opera a uma pressão um pouco maior que a atmosférica. Então é adicionado NaOH, anti-incrustante e metabissulfito de sódio para

sequestrar o cloro. Do filtro multimídia, a água é encaminhada para um filtro cartucho para refinar ainda a mais a qualidade da água que vai entrar na osmose reversa que removerá impurezas. Esse filtro cartucho é composto por um recheio poroso. Para o processo de remoção mais refinada de impurezas, a UCP contém dois conjuntos de osmose reversa que consiste em aplicar sobre o fluido mais concentrado uma pressão hidrostática suficiente para vencer a pressão osmótica, de modo que se inverta o fenômeno de osmose. Ou seja, a água da solução salina passa para o lado da água pura, ficando assim retido os sais na membrana. A água que passou pela osmose se divide em duas linhas sendo permeado e o rejeito. O primeiro é encaminhado ao tanque de permeado e assim direcionado ao leito misto, que é composto por duas camadas: uma de resina aniônica e outra catiônica, que sequestra os últimos resquícios de íons presentes e após esse processo, a água está apta para ser utilizada na caldeira. O rejeito da osmose é uma água apropriada para se usar na indústria, porém não boa para o uso na caldeira, assim essa água é encaminhada para as tubulações e para ser utilizada no processo. Na Figura 23, ilustra-se o fluxograma da ETA.

Figura 23 – Fluxograma da ETA.

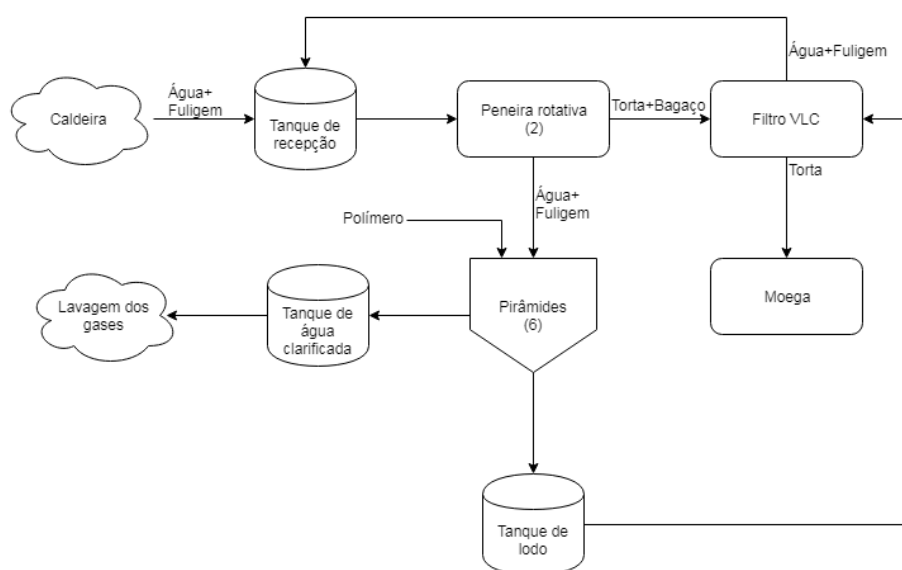


Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra linha de água das caldeiras é a de lavagem de gases, e esta água tem uma grande presença de fuligem, e assim ela passa por um tratamento que inicia com o direcionamento dessa água ao tanque de recepção e desse tanque é direcionada a peneira rotativa, onde o bagaço é separado da água e fuligem. A água com fuligem que passou pelos poros da peneira é encaminhada ao conjunto de pirâmides em que é adicionado um polímero que facilita a

decantação da fuligem no fundo piramidal formando o lodo. Em UCP, contem com um conjunto de seis pirâmides onde a água suja vai passando de uma para outra e no topo da pirâmide tem-se a saída da água tratada para retorno na lavagem de gases, com uma temperatura de 60°C e pressão de 3,5 kgf/cm². Os lodos provenientes das pirâmides e a parte que foi peneirada são encaminhados ao tanque de lodo, para então ser direcionado ao filtro VLC. O resíduo solido restante é encaminhado ao campo e a água com um pouco de fuligem é direcionada para o tanque de lodo do início do processo. Na Figura 24, ilustra-se o fluxograma da ETALG.

Figura 24 – Fluxograma da ETALG.

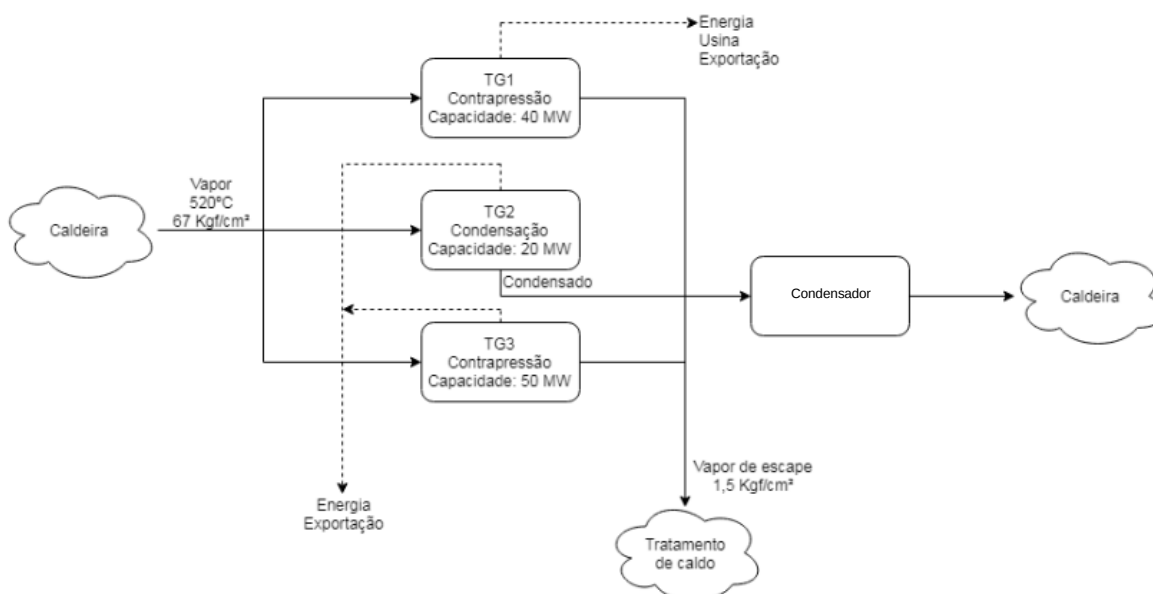


Fonte: Elaborado pelo autor.

O produto das caldeiras em UCP é o vapor superaquecido a uma temperatura de 520°C nominal (podendo variar entre 500/520, de acordo com a vazão da caldeira) e uma pressão de 67 Kgf/cm². Esse vapor será alimentado em um sistema de 3 turbogeradores, sendo que ele é composto pela turbina, o redutor de velocidade e o gerador denominado em UCP como o TG1, um turbogerador de contrapressão com capacidade nominal de 40 MW, que possui um vapor de saída, também chamado de vapor de escape, com uma pressão de 1,5 Kgf/cm². Esse vapor é utilizado na pré-evaporação do setor de tratamento de caldo, que depois de condensado retorna para a caldeira, no sistema de geração de vapor. O TG2 é um turbogerador de condensação com capacidade nominal de 20 MW, e é composto pela turbina, redutor, gerador e um condensador. Esse tipo de TG é mais econômico e opera a uma pressão menor que a ambiente (vácuo), o condensado originado é enviado a um tanque chamado de *hotwheel*, e posteriormente encaminhado ao desaerador para ser reutilizado na caldeira. O

TG3 é um turbogerador de contrapressão e opera da mesma maneira que o TG1, porém sua capacidade nominal é maior, 50 MW. O TG2 e TG3 são destinados exclusivamente para exportação de energia. Na Figura 25, ilustra-se o fluxo do processo da casa de força.

Figura 25 – Fluxograma da Casa de Força.



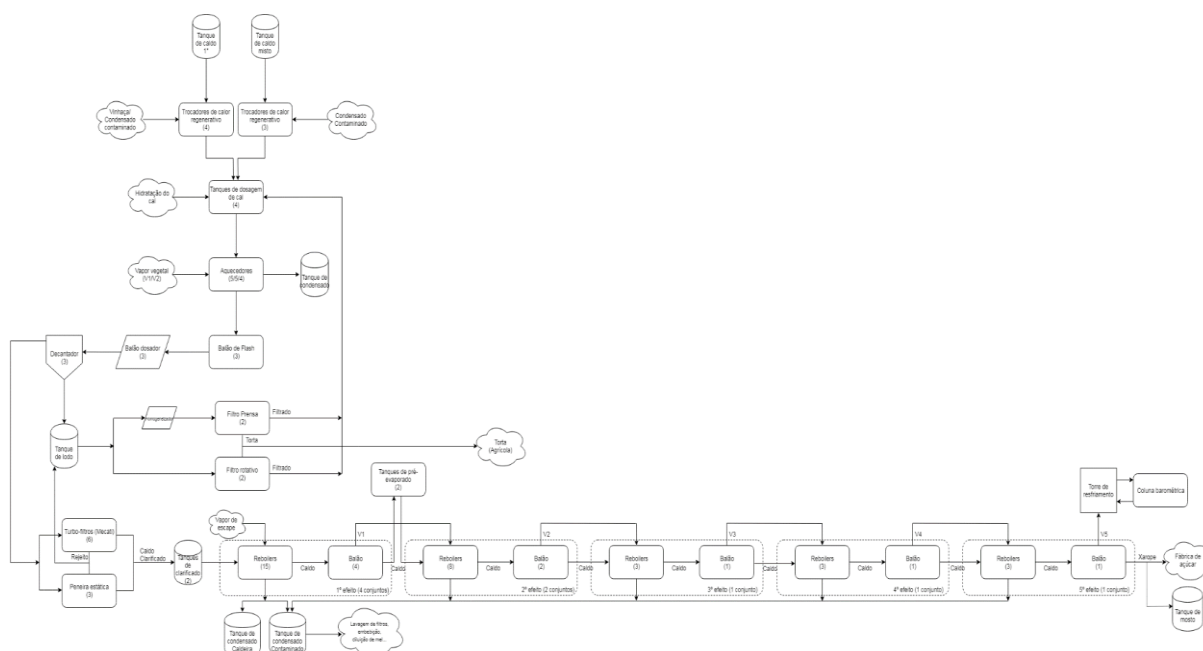
Fonte: Elaborado pelo autor.

A próxima etapa do processo é o tratamento de caldo onde todo o caldo extraído será tratado para diminuir ao máximo a quantidade de não-açúcares e outros compostos não desejados no produto final e ele inicia-se nos tanques do caldo primário e do caldo misto. Normalmente, o caldo primário (mais concentrado) é mais adequado para a produção de açúcar e o misto na produção de etanol. Dois parâmetros são cruciais para a realização de um bom tratamento é o controle de pH e de temperatura. Assim, o caldo logo após sair dos tanques é encaminhado aos trocadores de placas regenerativo e em UCP, são separados para cada caldo, sendo 4 trocadores para o caldo primário, onde 2 trocam com vinhaça e 2 com condensado, e 3 trocadores para o caldo misto que trocam com o condensado da pré-evaporação (aproveitando para resfriá-lo para a fermentação). Com o caldo previamente aquecido, ele é enviado aos tanques agitados de dosagem de cal. O pH do caldo para o açúcar deve estar em torno de 7,2 e para o etanol entre 5,8/6,2, e a dosagem e regulação é feita baseado na demanda do processo. Em seguida, o caldo dosado passa por um conjunto de aquecedores a fim de utilizar o vapor vegetal (V1 e V2) proveniente do conjunto de evaporadores para aquecer o caldo em torno de 105°C. O caldo dosado e aquecido é então direcionado ao balão de flash antes de ser encaminhado ao decantador. No balão de flash o

caldo que está pressurizado sofre uma ebulição espontânea após entrar no balão que está a pressão atmosférica auxiliando na remoção do vapor do caldo aquecido. Posteriormente, o caldo é encaminhado aos decantadores. O rejeito do decantador recebe o nome de lodo e é encaminhado ao tanque de lodo, e o caldo é encaminhado ao conjunto de turbo-filtros e peneiras estáticas. Os rejeitos desses filtros também são encaminhados a caixa de lodo e o caldo, agora chamado de caldo clarificado, será encaminhado aos evaporadores. Todo o rejeito dos decantadores e dos filtros ainda possuem uma porcentagem de açúcar e para diminuir as perdas, esse lodo passa por mais um conjunto de filtros paralelamente que são filtros rotativos e filtros prensa. O filtrado destes filtros é encaminhado novamente aos tanques de dosagem de cal e o rejeito, chamado de torta, é rico em material biológico e é encaminhado ao campo para ser utilizado como adubo para a terra.

O caldo clarificado é encaminhado a tanques pulmão para ser direcionado aos evaporadores, onde será concentrado e preparado para a fabricação de açúcar. Os evaporadores são divididos em 5 efeitos cada um com características operacionais diferentes e eles são formados por *reboilers* e balão de expansão (*Flash*). Os *reboilers* são trocadores de calor entre o caldo e o vapor do efeito anterior, sendo que o caldo passa pelos tubos e o vapor nas calandras. Os balões são responsáveis por separar o caldo do vapor por conta da diferença de pressão.

No 1º efeito é injetado o vapor de escape (1,5 Kgf/cm²), sendo que o condensado desse vapor é encaminhado a um sistema que analisa a condutividade da água. Se ela está dentro dos padrões é encaminhada para ser reutilizada na caldeira, se não está é encaminhada ao tanque de condensado contaminado. O vapor formado no 1º efeito é chamado de V1 que é encaminhado ao próximo evaporador e parte será utilizado no processo. O caldo do 1º efeito é chamado de pré-evaporado e é direcionado para dois tanques: 1 para o etanol e outro para o açúcar. No 2º efeito o caldo pré-evaporado troca calor com o V1, gerando o vapor V2 que também pode ser usado no processo. O condensado originado do V1 também é encaminhado ao tanque de condensado. Isso se repete até o 5º efeito, onde o xarope sai com uma concentração de adequada para a fábrica de açúcar. O vapor V5 é condensado em uma torre de resfriamento para ser utilizada nas colunas barométricas, que junto com as bombas, geram o vácuo necessário nos 4º e 5º efeitos, que possuem pressão negativa. Na Figura 26, ilustra-se o processo do tratamento de caldo.

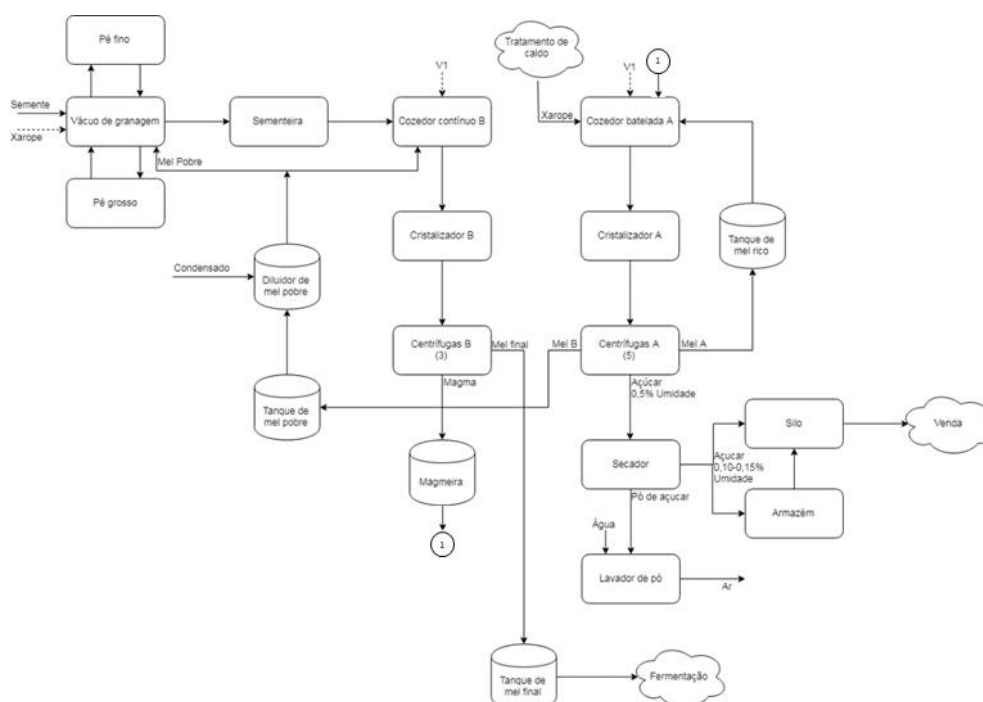
Figura 26 – Fluxograma do tratamento de caldo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Encaminhando para a produção de açúcar, com o xarope preparado nos evaporadores no tratamento de caldo, o processo se inicia com a adição de uma semente previamente preparada em laboratório, com uma granulometria desejada, que irá propiciar o crescimento dos cristais de açúcar. Essa semente é preparada adicionando uma quantidade de açúcar e etanol anidro em um moinho de bolas por 24 horas. Assim, este xarope entra no tanque de granagem aquecido por V1 e com o começo da formação dos cristais, metade da mistura é enviada para a sementeira de corte (Pé Fino), e o que restou no tanque é alimentado com mel pobre (mel B). Após um tempo de mistura, metade é desviado ao vaso de corte (Pé Grosso), e novamente o que restou é preenchido com mel pobre. Em seguida, a partir da sementeira, a massa B segue para o cozedor contínuo que é alimentado por vapor vegetal V1. No cozedor, o cristal que já foi formado sofrerá um aumento de sua granulometria, tornando a massa B. Após o cozedor, a massa B é encaminhada ao cristalizador onde a mesma permanecerá em repouso até ser encaminhada para as centrífugas contínuas e nela ocorrerá a separação do magma que retorna para um novo processo de fabricação do açúcar e o rejeito, chamado de Mel Final é enviado ao tanque de mosto para ser utilizado na fermentação. O magma é direcionado a um tanque agitado, chamado de Magmeira e ele junto com o xarope será encaminhado ao cozedor de massa A, que é um conjunto de equipamentos em batelada com alimentação de V1. A massa A cozida é encaminhada ao cristalizador A, onde aguardará até seguir para as centrífugas bateladas, e nela é extraído o mel rico, os cristais de açúcar e o mel

pobre. O mel rico retorna ao cozedor de massa A para diminuir a utilização de xarope, já o mel pobre retorna para ser utilizado no vácuo de granagem, na cristalização. Os cristais de açúcar passam por um secador que utiliza ar ambiente captado pelos exaustores, e ao mesmo tempo que seca também resfria o açúcar. Com o açúcar agora seco, ele passa por uma balança presente diretamente na esteira, para então ser encaminhado ao armazém ou diretamente aos silos, onde os caminhões são carregados. Na Figura 27, ilustra-se o fluxograma da fábrica de açúcar.

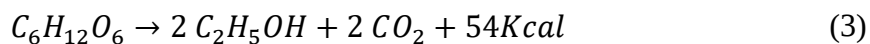
Figura 27 – Fluxograma da fábrica de açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra opção para a produção a fermentação e seu processo se inicia no tanque de mosto, onde diversas linhas podem ser misturadas como caldo clarificado, caldo pré-evaporado, caldo misto, mel final, xarope e condensado contaminado. Desta forma, o mosto passa por um misturador estático para melhor homogeneização dos caldos. Nessa etapa, o mosto se encontra a uma temperatura em torno de 70°C, sendo que ele deve estar em torno de 32°C na alimentação da dorna. O resfriamento é feito em trocadores de placas, utilizando água de resfriamento. A preparação da dorna é feita com adição de fermento hidratado, previamente preparado nas cubas, e adição de mosto. O ciclo das dornas gira em torno de 8 horas, podendo mudar de acordo com as condições de trabalho. Durante o ciclo ocorrerá a transformação do açúcar em etanol e CO₂ pela ação da levedura, que em anaerobiose segue a

seguinte reação expressa da equação 3.

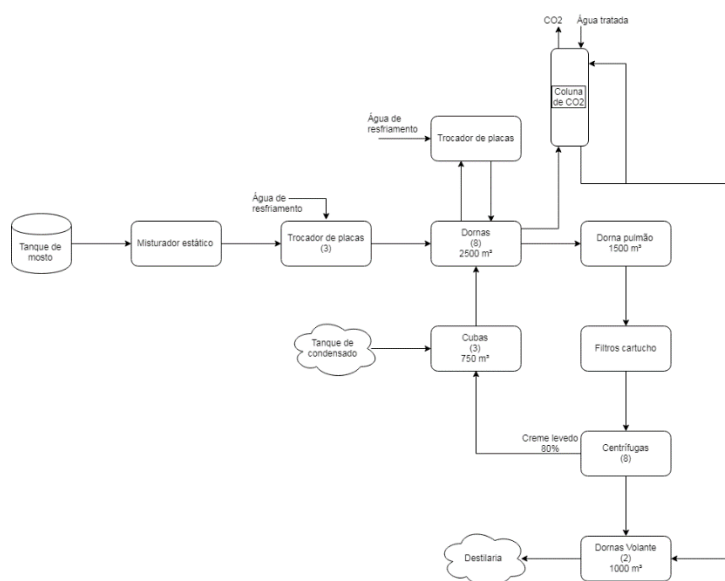


Para verificar o término da fermentação, análises de Brix são feitas e quando há repetições nos valores calculados, indica que a fermentação chegou ao fim. Ainda durante a fermentação, o mosto é recirculado em um trocador de placas utilizando água de resfriamento para manter a temperatura de fermentação correta. Nas dornas pode ocorrer a formação de espuma e quando ela chega a um nível limite, automaticamente é adicionado anti-espumante.

Como pode ser visto pela estequiometria da reação, durante a fermentação CO_2 é formado na mesma proporção em etanol, e em muitas usinas os tanques são abertos para liberação desse gás. Porém, sabe-se que uma parte do etanol é arrastado junto e por esse motivo faz-se o uso de uma torre de CO_2 , similar a um aparelho de destilação, composta por bandejas. A água proveniente da ETA, em contra-corrente, lava o CO_2 carregando o etanol presente.

O vinho levedurado depois de fermentado é encaminhado a dorna pulmão e então aos filtros cartuchos a vácuo com sistema de autolimpeza que irão retirar impurezas que podem vir a entupir os bicos das centrífugas e nelas é onde ocorrerá a separação entre creme de levedo e o vinho delevedurado. O creme retorna as cubas e lá ocorre o crescimento das leveduras e sua preparação para ser reutilizado nas dornas de fermentação com o acréscimo de antibióticos, nutrientes, dispersante e ácido sulfúrico para correção do pH. O vinho delevedurado a dorna volante para ser direcionado a destilaria. Na Figura 28, ilustra-se o fluxograma da fermentação.

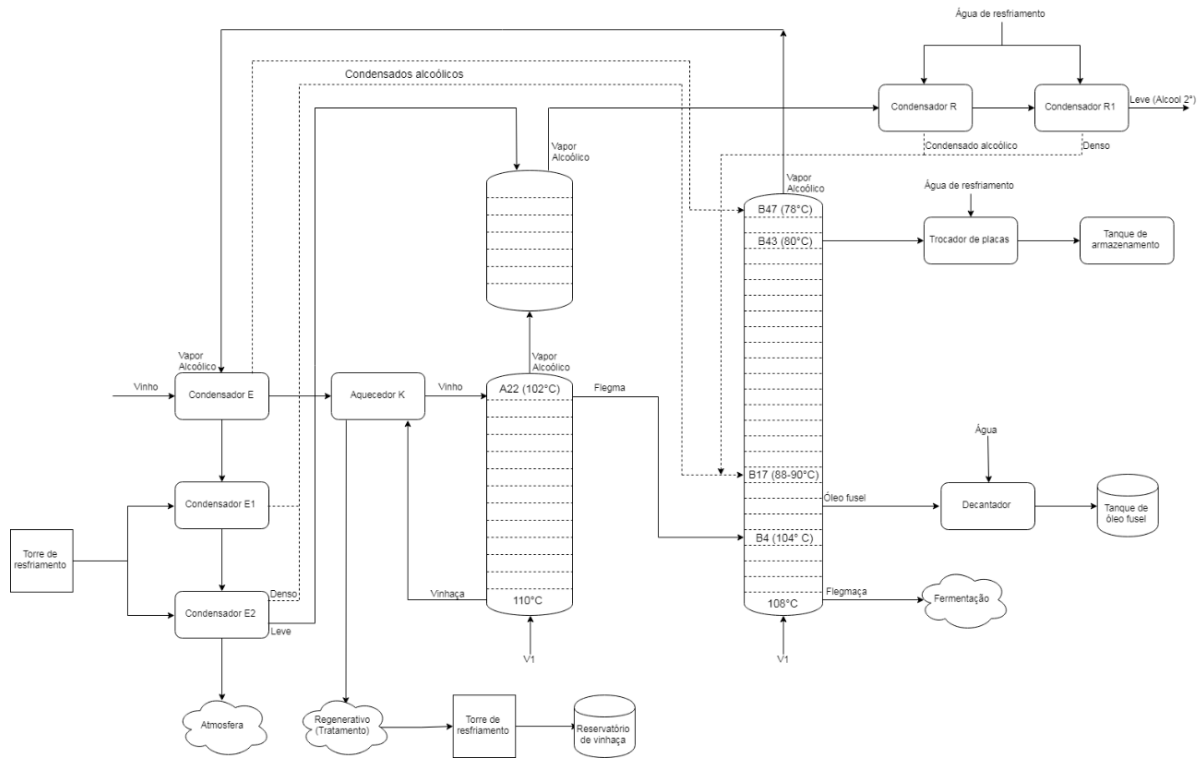
Figura 28 – Fluxograma da fermentação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o vinho delevedurado, o processo final é na destilaria, e o funcionamento da destilação se baseia na separação de componentes que possuem volatilidades diferentes, dessa forma o etanol, que já foi produzido na fermentação, é enriquecido em relação aos outros componentes presentes. As colunas de destilação possuem no seu interior diversos pratos com orifícios que permitem que a fase vapor suba e a fase líquida desça. O processo se inicia com o aquecimento do vinho delevedurado e assim ele passa pelo condensador E, onde ele atinge a temperatura de 70°C em contracorrente com os vapores da coluna B. Em seguida, seguem até o aquecedor K, onde retiram calor da vinhaça atingindo a temperatura de 95°C. Após esse pré-aquecimento, o vinho alimenta a bandeja da coluna A. No topo são retirados os vapores alcoólicos (álcoois superiores) que seguem a coluna retificadora D. Na bandeja superior, é retirado a flegma a uma temperatura de 102°C e que será alimentado na bandeja da coluna B, para desidratação do álcool. Na base da coluna tem-se o produto de fundo a uma temperatura de 110°C, conhecido como vinhaça, praticamente isenta de etanol, que após passar pelo aquecedor K, troca calor com o caldo no regenerativo do tratamento, segue para a torre de resfriamento e então é encaminhada a um reservatório, com uma temperatura abaixo de 55°C, para ser utilizada no campo. No topo da coluna B, os vapores alcoólicos passam pelos trocadores E, E1 e E2. A retirada de etanol é feita na bandeja 43 para diminuir a contaminação de compostos mais voláteis, com uma concentração de 96°GL e 92,8 INPM. Antes de ser estocado, passa por um trocador de placas com água de resfriamento para troca térmica. Já no fundo da coluna B é retirado a flegmaça a uma temperatura de 108°C, utilizada para limpeza dos equipamentos da fermentação. A coluna D possui 6 bandejas no total, e recebe os vapores alcoólicos ao fundo, e o condensado leve do trocador E2 por cima. Nela retira-se apenas o vapor de topo, que passa pelo trocador R, com o condensado retornando a coluna B e o vapor segue para o trocador R1, no R1 há a separação de condensado mais denso que também retorna a coluna B e o mais leve é o chamado álcool de segunda. O fluido de troca utilizado é também água de resfriamento. Na Figura 29, ilustra-se o fluxograma da destilaria.

Figura 29 – Fluxograma da destilaria



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 TURBOGERADOR NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

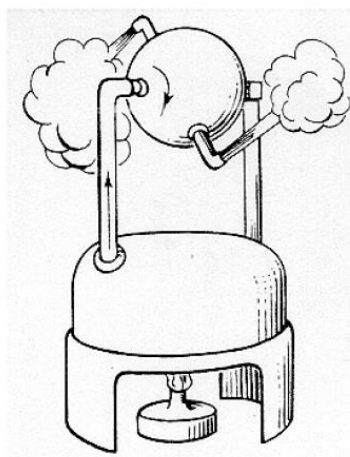
O bagaço de cana-de-açúcar é o resíduo fibroso resultante da extração do caldo da cana e é a principal fonte de energia para as caldeiras nas usinas sucroenergéticas. Antigamente, o bagaço era considerado um resíduo industrial, sendo queimado nas usinas principalmente para evitar problemas de descarte, no entanto, com as crises do petróleo e a crescente necessidade de reduzir custos de produção no setor, o bagaço passou a ser valorizado como um subproduto energético de alto potencial (RAMOS; SILVA, 2009).

4.1 TURBINAS À VAPOR

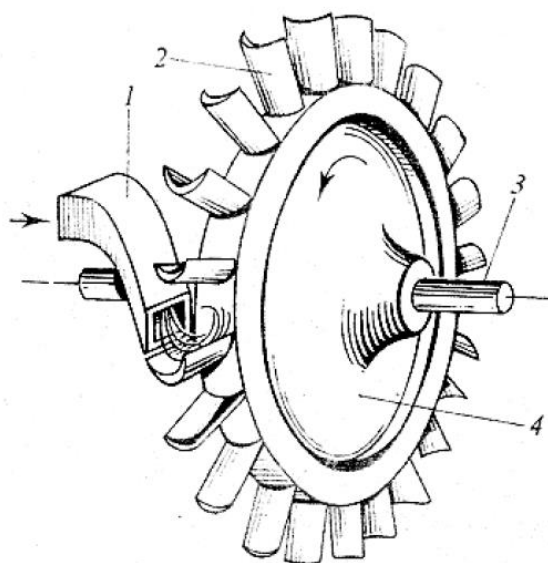
Para a compreensão das turbinas a vapor turbinas a vapor deve-se analisar a turbina de Herón cuja descrição foi realizada em 175 a.C. e ela consistiu de uma esfera que girava de livremente torno de um eixo diametral, cujos apoios ficavam nos seus extremos em dois suportes. No interior da esfera, entrava o vapor produzido por dois tubos diametralmente opostos e direcionados em sentido contrário. Desta forma, a transformação de pressão em velocidade ocorria no elemento móvel, que no caso era a esfera. Na Figura 30, ilustra-se a turbina de Herón (RAMOS; SILVA, 2009).

Assim, a história da turbina a vapor se iniciou no final do século XIX e o seu primeiro inventor foi o suéco De Laval (1845-1913), e ele precisava de um motor de alta velocidade para seu desnatador de leite centrífugo e desta forma, ele criou a turbina a vapor de ação de estágio único e para isto desenvolveu um bico especial, chamado "tobera", que acelerava o vapor a velocidades supersônicas e um eixo flexível que podia girar a até 30.000 RPM. Na Figura 31, ilustra-se a turbina de De Laval (RAMOS; SILVA, 2009).

O segundo inventor importante para história do desenvolvimento das turbinas foi o inglês Parsons (1854-1931) que em 1895, procurando um motor mais eficiente para navios, ele desenvolveu a turbina a vapor de reação de múltiplos estágios, e usando um rotor duplo, Parsons conseguiu um desempenho muito melhor em comparação com as máquinas a vapor alternativas que eram usadas nos barcos da época. Diante disto, as turbinas a vapor são máquinas que operam em velocidades muito altas. Se toda a energia disponível no vapor fosse convertida em velocidade em um único bico, a velocidade do vapor seria muitas vezes maior que a do som. A velocidade da parte giratória (rotor) para aproveitar essa energia de forma eficiente poderia até ultrapassar o limite de resistência dos materiais usados na sua construção (RAMOS; SILVA, 2009).

Figura 30 – Turbina de Herón

Fonte: (RAMOS; SILVA, 2009).

Figura 31– Turbina à vapor de De Laval.

Fonte: (RAMOS; SILVA, 2009).

A definição de uma turbina a vapor é um motor térmico rotativo, no qual a energia térmica do vapor, medida pela entalpia, é transformada em energia cinética, devido à sua expansão através dos bocais. Esta energia então é transformada em energia mecânica de rotação devido à força do vapor agindo nas pás rotativas. E uma turbina a vapor é essencialmente composta por seis elementos principais que trabalham em conjunto para converter a energia térmica do vapor em energia mecânica. Primeiro, a carcaça e esta é a estrutura externa da turbina, geralmente dividida em duas partes no sentido longitudinal. Essa

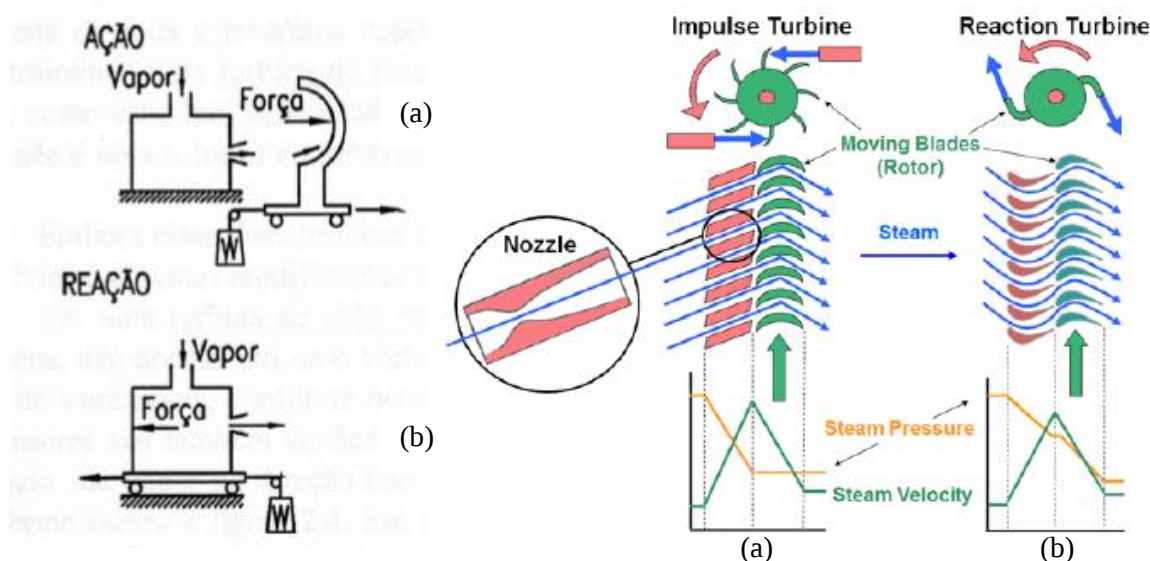
divisão facilita bastante a montagem e desmontagem, e dentro dela ficam as palhetas fixas, que servem para direcionar o fluxo do vapor. Em segundo lugar, o rotor e este é a parte que gira, e em sua periferia estão as palhetas onde o vapor incide e neles acontece a transformação da energia, pois a direção e a magnitude da velocidade do vapor mudam, fazendo o rotor girar. O terceiro componente é o sistema de comando e válvulas sendo responsável por regular a velocidade e a potência da turbina. Atua na modificação da descarga do vapor, controlando assim o quanto de energia está sendo gerada. Em quarto lugar, temos o acoplamento e ele é a conexão mecânica que liga a turbina ao redutor e que liga o redutor ao gerador. Ele é um elo crucial para transmitir a energia mecânica gerada. O quinto elemento é o dispositivo de expansão e ele é um dispositivo é sempre formado por um bocal fixo ou móvel, também chamado de diretrizes e é nele que a energia de pressão do vapor é convertida em energia cinética, ou seja, o vapor ganha velocidade antes de atingir as pás do rotor. Por fim, estão as juntas de labirinto e elas são importantes para reduzir o calor gerado caso haja contato entre o rotor e o estator. Devido às altíssimas velocidades de rotação, qualquer contato pode produzir calor suficiente para derreter o material do rotor ou até mesmo danificar o eixo da turbina, tornando essas juntas essenciais para a segurança e durabilidade do equipamento (RAMOS; SILVA, 2009).

As turbinas a vapor podem ser classificadas de acordo com direção do movimento do vapor em relação ao rotor, a forma como o vapor atua no rotor e baseado na condição do vapor de escape, na exaustão da turbina. Considerando o primeiro, tem-se as turbinas a vapor axiais que são as mais comuns e nela o vapor se move dentro do rotor em uma direção que é aproximadamente paralela ao eixo da turbina. Há as turbinas a vapor radiais e o movimento do vapor é de forma aproximadamente perpendicular ao eixo da turbina, pois o vapor pode entrar pelo centro e se mover para fora, ou vice-versa, em relação ao eixo. Tem-se as turbinas a vapor tangenciais e nelas o vapor se desloca de forma tangencial ao rotor, ou seja, o vapor se choca com as palhetas de maneira lateral, em vez de fluir paralelamente ou perpendicularmente ao eixo (RAMOS; SILVA, 2009).

A segunda classificação se baseia em como a energia do vapor é convertida em trabalho mecânico, especificamente onde a expansão do vapor acontece e a primeira são as turbinas a vapor de ação e nelas vapor se expande somente nos componentes fixos e isto significa que toda a queda de pressão do vapor ocorre antes de ele atingir as pás móveis do rotor. Consequentemente, a pressão do vapor é a mesma em ambos os lados do rotor e a força que move o rotor vem da alta velocidade do vapor que incide sobre as pás. Há as turbinas a vapor de reação e diferente das de ação, nas turbinas de reação o vapor também se expande

dentro do próprio rotor, implicando em uma pressão do vapor na entrada do rotor é maior do que na saída e a força que impulsiona o rotor não vem apenas da velocidade do vapor, mas também da "reação" causada pela expansão do vapor nas pás móveis. Na Figura 32, ilustra-se a diferença entre a de ação e reação (WEG - TGM, 2024).

Figura 32 – Turbina a vapor de ação (a) e reação (b).



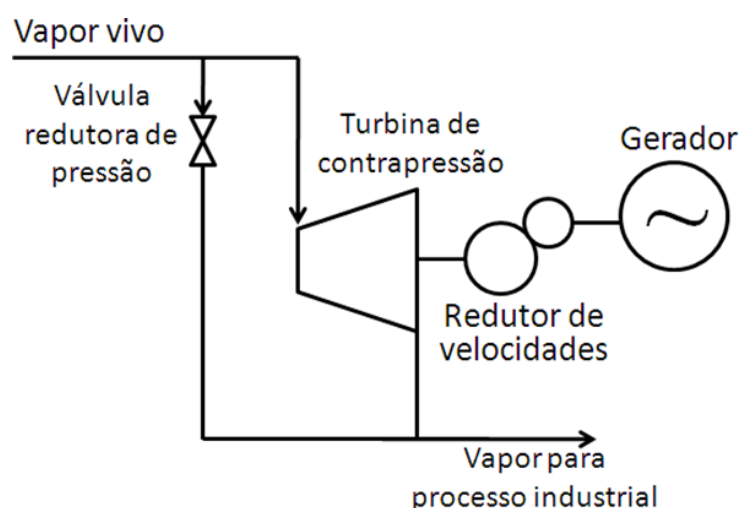
Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Para a classificação com relação ao vapor de escape, e considerando as utilizadas em usinas do setor sucroenergético, há três configurações principais de sistemas de cogeração utilizando turbinas a vapor, sendo a primeira de turbinas de contrapressão e nesta configuração, o vapor na saída está a uma pressão igual ou superior à atmosférica, ou seja, significa que o nível de pressão do vapor de descarga ou escape é ajustado de acordo com a necessidade do processo industrial onde esse vapor será reutilizado. Como o vapor de escape da turbina de contrapressão é conectado diretamente à linha de suprimento de vapor para o processo industrial, a operação dessa turbina está intrinsecamente ligada à demanda de vapor do tratamento de caldo e a necessidade de gerar energia elétrica. Importante referir que mesmo que ocorram falhas durante a operação da turbina, comprometendo a geração de eletricidade, o suprimento de vapor para o processo industrial não deve ser interrompido e para garantia desta continuidade, é instalado uma linha de vapor paralela equipada com uma válvula redutora de pressão, assegurando o funcionamento da produção industrial de forma reduzida. Na Figura 33, ilustra-se o diagrama de funcionamento de uma turbina de

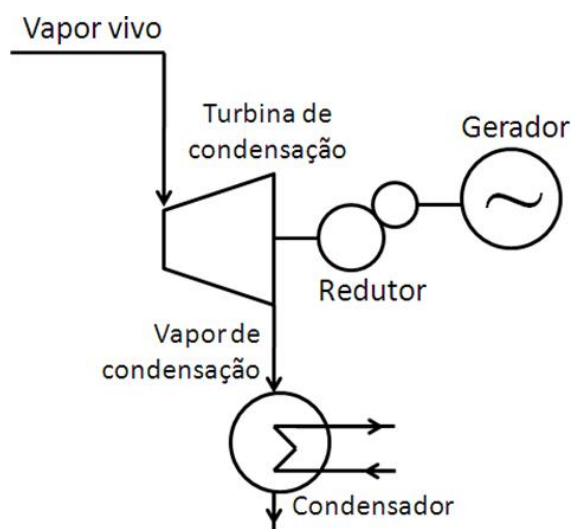
contrapressão (SANTOS, 2012).

A segunda, são as turbinas de condensação direcionam o vapor de sua exaustão para um condensador, um equipamento que opera em uma pressão muito baixa (alto vácuo), inferior à pressão atmosférica e o uso disto tem como motivo principal maximizar a absorção da energia térmica do vapor. Ao permitir uma queda de pressão o maior possível dentro da turbina, consegue-se extrair o máximo de energia do vapor antes que ele seja descartado. Embora as turbinas de condensação sejam construídas de forma similar às turbinas de contrapressão, elas são fisicamente maiores para uma mesma potência por terem um maior número de estágios e esta quantia a mais atuam para extrair o máximo da energia (entalpia) contida no vapor. Em condições de baixíssima pressão na saída da turbina, o vapor saturado, que é o vapor prestes a se transformar em líquido, passa por uma grande expansão dentro da máquina liberando uma boa quantidade de energia. Desta forma, o princípio de destas turbinas é proporcionarem uma maior a queda de pressão, maior a expansão do vapor e, conseqüentemente, maior o aproveitamento de sua energia. Essa é a ideia central por trás do uso de turbinas de condensação, especialmente porque o vapor de escape não será utilizado em processos industriais, ele é enviado diretamente para um condensador, onde retorna ao estado líquido para ser reutilizado no ciclo. Na Figura 34, ilustra-se o esquema das turbinas de condensação (SANTOS, 2012).

Figura 33 – Turbina de contrapressão.

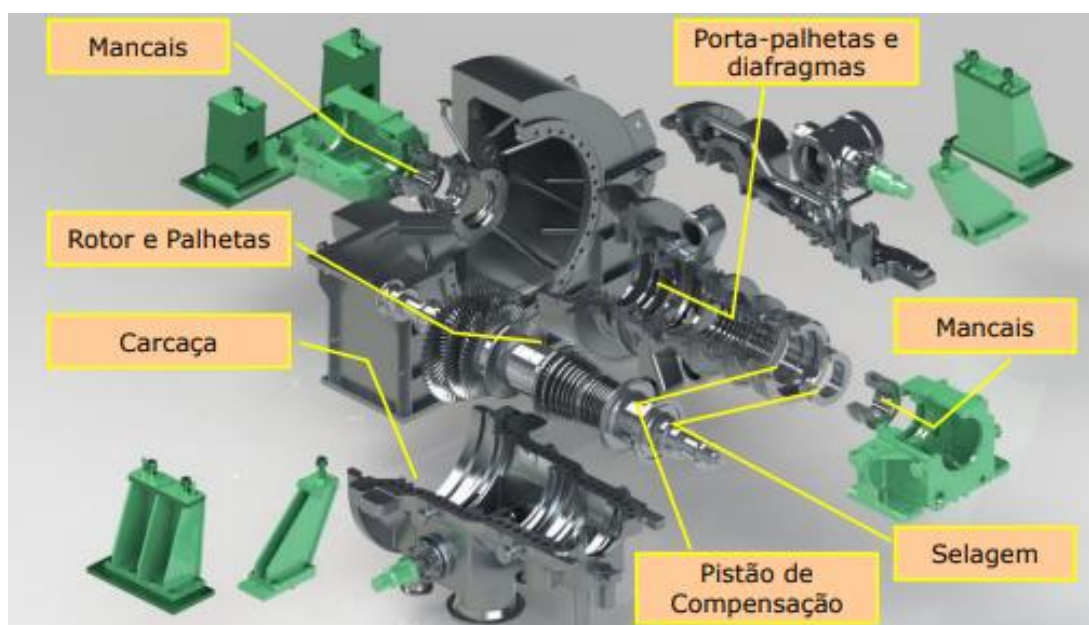


Fonte: (SANTOS, 2012).

Figura 34 – Turbina de condensação.

Fonte: (SANTOS, 2012).

Para o entendimento do funcionamento das turbinas, na Figura 35, exibe-se os seus principais componentes estruturais e dentre eles está presente a carcaça, rotor, palhetas, mancais, porta-palhetas, diafragma, pistão de compensação e selos labirintos (WEG - TGM, 2024).

Figura 35 – Componentes turbina.

Fonte: (WEG - TGM, 2024).

As carcaças das turbinas são projetadas para resistir a condições extremas, incluindo a pressão e temperatura elevadas do vapor, além dos esforços mecânicos que podem surgir em

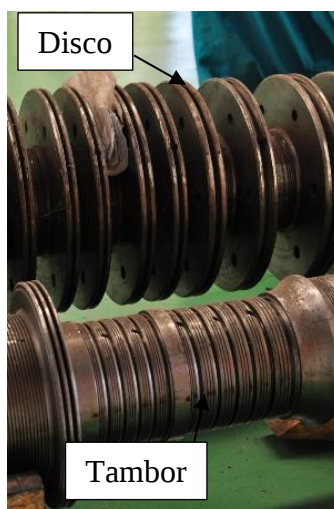
situações de acidente. Para facilitar tanto a fabricação quanto a montagem, essas carcaças são bipartidas horizontalmente, ou seja, elas são divididas em duas metades que se encaixam. Geralmente, as carcaças de baixa pressão são construídas a partir de chapas caldeiradas, um método que envolve a união de placas metálicas por soldagem. E considerando o processo de construção, é importante ressaltar que o aquecimento da carcaça é uma etapa fundamental nos procedimentos operacionais e isto é realizado para preparar a estrutura para as altas temperaturas de trabalho e evitar choques térmicos que poderiam comprometer sua integridade. Na Figura 36, ilustra-se uma fotografia da carcaça inferior (WEG - TGM, 2024).

Figura 36 – Carcaça



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Essencialmente, uma turbina é uma máquina que possui uma parte móvel giratória, conhecida como rotor e ele consiste em um eixo com palhetas acopladas. E desta maneira vapor em movimento atua sobre essas palhetas, fazendo-as girar e transferindo sua energia para o rotor da turbina a vapor na forma de movimento rotacional a partir da expansão do vapor por cada estágio, pois a cada um deles, a energia liberada na expansão é desenvolvida pelo movimento do rotor. As turbinas de ação são caracterizadas por utilizarem rotores com discos. Já as turbinas de reação empregam rotores de tambor, isto conforme ilustrado na Figura 37 (WEG - TGM, 2024).

Figura 37 – Rotor

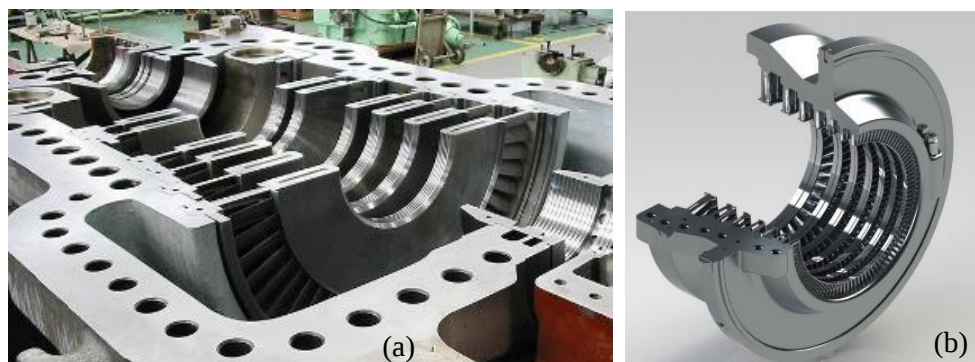
Fonte: (WEG - TGM, 2024).

A eficiência das turbinas está diretamente influenciada pelo design de suas palhetas e nos últimos anos, um notável crescimento na eficiência das palhetas tem sido observado, isto se deve principalmente a dois fatores cruciais, sendo a evolução no design aerodinâmico, que agora é meticulosamente calculado por computadores, e a adoção de tornos de comando numérico (CNC), que são capazes de fabricar essas palhetas com precisão inigualável. Além disso, o projetista precisa considerar cuidadosamente o estresse mecânico que as palhetas enfrentarão, pois este fator é fundamental para evitar vibrações indesejadas e possíveis falhas por fadiga, que podem ser causadas por forças centrífugas, ressonância, erosão ou corrosão. Garantir a robustez contra esses fatores é tão importante quanto o design aerodinâmico para a longevidade e o desempenho da turbina. A instalação das palhetas, podem ser em diafragmas, estes aplicados em turbinas de ação ou em porta-palhetas, estes aplicados em turbinas de reação. Na Figura 38, ilustra-se um exemplo de palheta e na Figura 39 a aplicação em diafragma e porta-palheta (WEG - TGM, 2024).

Figura 38 – Palheta

Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Figura 39 – Diafragma (a) e porta-palheta (b).

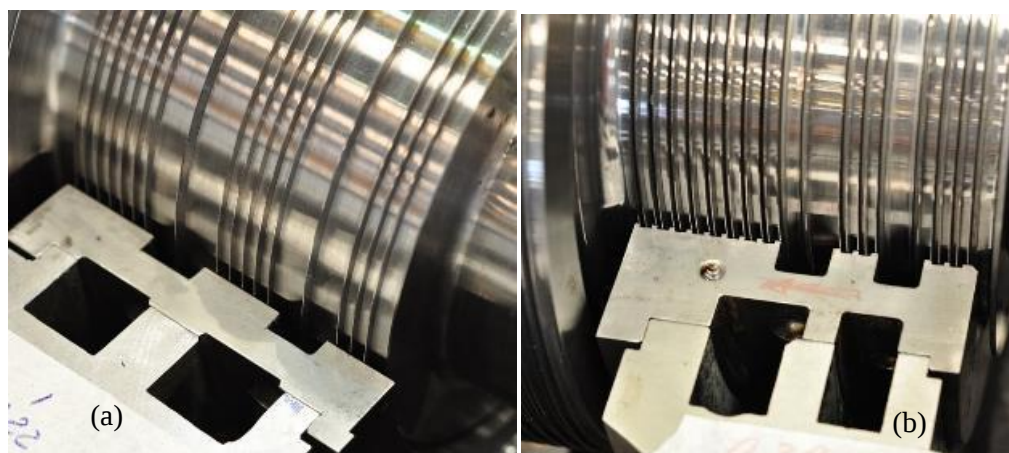


Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Há mecanismos mecânicos presentes para evitar perda de vapor entre suas partes estacionárias e móveis e elas são as juntas de labirinto são cruciais para a eficiência de uma turbina. Elas funcionam através do uso de fitas de labirinto projetadas com folgas mínimas, variando de 0.1mm a 0.3 mm. Essas selagens são empregadas para prevenir o vazamento de vapor tanto para fora da turbina quanto entre os seus diferentes estágios e no pistão de balanço. Em particular, entre os estágios da turbina, são utilizadas múltiplas ranhuras e fitas simples para garantir uma vedação eficaz. Para as máquinas de condensação, que operam em baixa pressão, a selagem de baixa pressão também utiliza fitas simples. Na Figura 40, ilustra-se os selos labirintos com fita múltipla e simples (WEG - TGM, 2024).

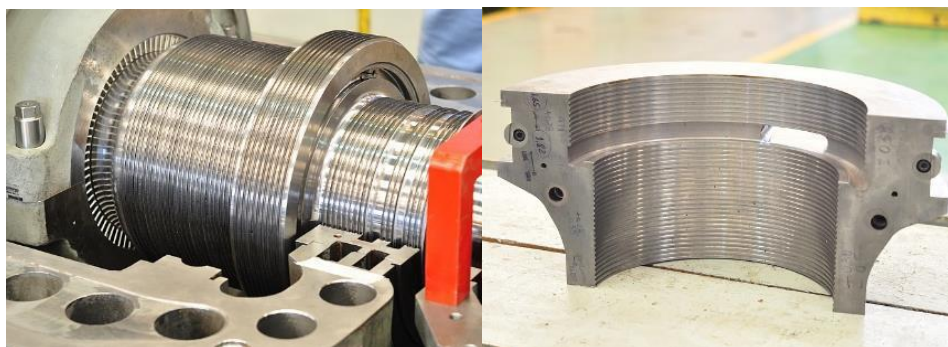
O dimensionamento correto das fitas de selagem é fundamental porque permite equilibrar as forças geradas por diferentes pressões, garantindo assim a manutenção da posição axial dos componentes da turbina e desta maneira, é empregado o pistão de compensação e a bucha de compensação que atuam para manter essa posição axial. Na Figura 41, ilustra-se estes componentes (WEG - TGM, 2024).

Figura 40 – Fita simples (a) e fita múltipla (b).



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Figura 41 – Pistão de compensação (a) e bucha de compensação (b).



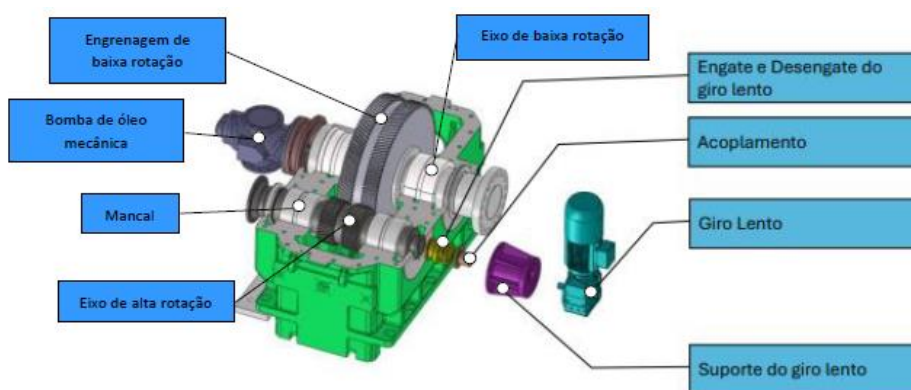
Fonte: (WEG - TGM, 2024).

4.2 REDUTOR DE VELOCIDADE

Na maioria das aplicações, a rotação do eixo da turbina é maior do que a do gerador e a rotação do gerador é determinada pela frequência da rede elétrica e pelo número de polos dele e a rotação da turbina é definida pelo seu projeto, como o diâmetro do rotor, a altura das palhetas, a potência necessária e a resistência mecânica de seus componentes e desta maneira, quando a turbina e o gerador operam em rotações diferentes, um redutor de velocidades é usado para transmitir o torque do eixo da turbina para o gerador (SANTOS, 2012).

A composição do redutor é, essencialmente, uma caixa de engrenagens de eixos paralelos, normalmente composta por um par de engrenagens tipo coroa e pinhão. Esses eixos são apoiados em mancais de deslizamento, que são lubrificados e resfriados a óleo. Na maioria dos casos, as pontas dos eixos do redutor são flangeadas para facilitar o acoplamento tanto com a turbina quanto com o gerador. Na Figura 42, ilustra-se os componentes do redutor de velocidade (WEG - TGM, 2024).

Figura 42 – Componentes presentes no redutor de turbogeradores.



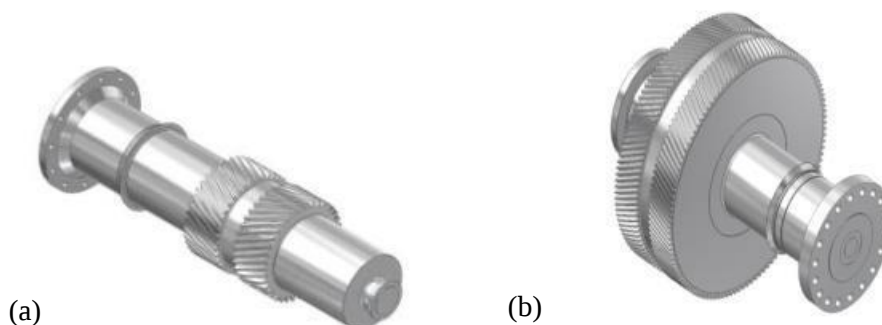
Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Verificando o mancal, onde é realizado o apoio dos eixos, observa-se que dimensionamento das carcaças é feito de forma que o contato entre o diâmetro externo dos mancais seja de, no mínimo, 80%. Assim, durante o funcionamento, a pressão de óleo projetada forma um filme de óleo entre o diâmetro interno dos mancais e os colos dos eixos. E este filme mantém os eixos centralizados enquanto a máquina trabalha, evitando o contato direto de metal com metal entre o colo do eixo e o metal patente do mancal. Esta estrutura desempenha um papel crucial na absorção de vibrações, contribuindo para a operação suave e a longevidade do equipamento (WEG - TGM, 2024).

Analisando o formato do dentado bi-helicoidal, presente nas engrenagens na Figura 43, esta é uma característica de engrenagens que oferece vantagens significativas, especialmente para aplicações com altas rotações, preferencialmente acima de 3600 RPM. Uma de suas principais características é a força axial nula, o que significa que não há empuxo lateral significativo, reduzindo o estresse nos mancais. Esse design também permite um maior número de dentes em contato simultaneamente, o que contribui para uma distribuição mais uniforme da carga. Além disso, o dentado bi-helicoidal se destaca pelo uso de ângulos de hélice superiores a 25° de inclinação, resultando em menor ruído durante a operação. Estas características o tornam ideal para sistemas que exigem alta eficiência, durabilidade e operação menos ruidosa. Na Figura 43, ilustra-se o eixo de alto rotação e o de baixa rotação do redutor (WEG - TGM, 2024).

Considerando as engrenagens do eixo de alta rotação, elas são fabricadas com o material 18CrNiMo7-6 e após a usinagem, os dentes passam por um processo de cementação e, em seguida, seus flancos são retificados para garantir precisão e durabilidade. Os colos dos mancais também são retificados com alta precisão e a diferença máxima permitida entre os diâmetros é de apenas 0,015 mm. Essa tolerância rigorosa é crucial para assegurar que não haja interferência no contato de engrenamento, garantindo o funcionamento suave e eficiente. Já o eixo de baixa rotação, o material escolhido para sua constituição é baseado no torque que ele precisa suportar, podendo ser SAE 1045 B ou SAE 4140 B e no seu processo de fabricação, os dentes das engrenagens são cementados. Em seguida, após o encamisamento do eixo na engrenagem, os flancos dos dentes são retificados para garantir alta precisão. Para uma verificação precisa do contato entre os dentes das engrenagens, é essencial que a carcaça esteja perfeitamente nivelada, utilizando um nível de precisão (WEG - TGM, 2024).

Figura 43 – Eixo de alta rotação (a) e de baixa rotação (b).



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

4.3 GERADOR SÍNCRONO

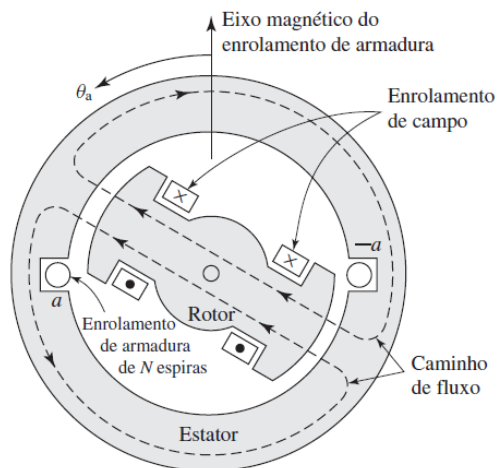
As máquinas elétricas rotativas podem ser diversas formas e elas são descritas de diversas maneiras, como uma máquina CC, síncronas, de ímã permanente, de indução, de relutância variável, de histerese e sem escovas. Diante disto, mesmo que sejam essas máquinas distintas, os princípios físicos que permeiam os seus comportamentos são muito semelhantes. As máquinas CA pode ser classificadas basicamente em duas categorias sendo a síncronas e a de indução. Na primeira, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas diretamente na parte estacionária do motor através de contatos rotativos e na segunda, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação das correntes de estator e do movimento do rotor em relação ao estator, isto tudo no decorrer do tempo (UMANS, 2014).

O enrolamento de armadura de uma máquina síncrona, geralmente, está no estator e o enrolamento de campo, rotor. Este último, é excitado por uma corrente contínua que é disponibilizada através de escovas de carvão que fazem contato com anéis coletores, e outra forma que levar a corrente para o rotor é através de um sistema de excitação rotativo, conhecido como sistema de excitação sem escovas (*“Brushless”*) (UMANS, 2014).

Como rotor a partir de uma fonte de potência mecânica conectada ao seu eixo e considerando um gerador síncrono de polos salientes, como ilustrado na Figura 4.14, e supondo que o enrolamento de armadura esteja em circuito aberto e desta forma o fluxo desenvolvido pela máquina é apenas enrolamento de campo e assim, observando os caminhos de fluxo como mostrado na Figura 44. verifica-se que o fluxo magnético no entreferro varia de forma senoidal. Então, à medida que o rotor gira, o fluxo concatenado do enrolamento da armadura varia no tempo e considerando a velocidade do rotor seja constante, a tensão

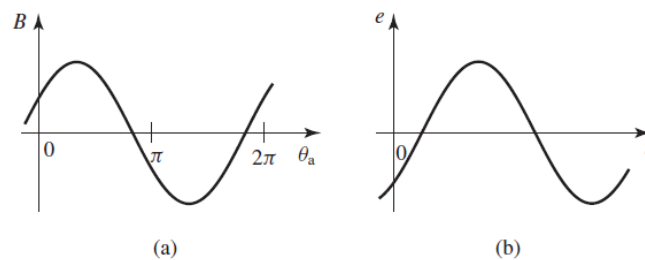
resultante na bobina será senoidal no tempo, como na Figura 45. Estudando o comportamento gráfico da tensão da bobina, ao passar por um ciclo completo a cada revolução da máquina de dois polos, sua frequência em ciclos por segundo é a mesma que a velocidade do rotor em rotações por segundo, concluindo que a frequência elétrica da tensão gerada está sincronizada com a velocidade mecânica, sendo esta a definição do nome de máquina síncrona (UMANS, 2014).

Figura 44 – Gerador síncrono de 2 polos salientes.



Fonte: (UMANS, 2014).

Figura 45 – Densidade do fluxo no entreferro (a) e a tensão gerada (b).



Fonte: (UMANS, 2014).

Portanto, a tensão de bobina de uma máquina de múltiplos polos passa por um ciclo completo toda vez que um par de polos passa pela bobina, assim, pode-se definir a frequência elétrica f_e da tensão gerada em uma máquina síncrona, exibido na expressão 4 (UMANS, 2014).

$$f_e = \left(\frac{\text{polos}}{2} \right) * \frac{n}{60} \quad (4)$$

Em que “n” é a rotação do rotor em RPM e “ f_e ” a frequência elétrica da tensão no enrolamento de armadura, isto em Hz (Hertz). Com relação a variação no tempo do fluxo magnético φ e a tensão induzida e nos enrolamentos em circuitos magnéticos, seu comportamento é descrito pela expressão 5 (UMANS, 2014).

$$e = N * \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (5)$$

Onde “N” é o número de espiras, φ o fluxo magnético e λ , o fluxo concatenado.

Os rotores de polos salientes contem enrolamentos concentrados, porém há um rotor de polos não salientes, referido como liso, onde o seu enrolamento de campo no rotor é um enrolamento distribuído em múltiplas ranhuras ao longo da periferia do rotor e posicionados de modo a formar uma distribuição aproximadamente senoidal do fluxo radial no entreferro e observando a aplicação de polos salientes, este é característica de geradores hidrelétricos, pois suas turbinas trabalham em velocidades mais baixas necessitando de um número elevado de polos para obter a frequência definida e para esta situação a escolha por polos salientes é mecanicamente melhor adaptada. Para a realidade de turbinas a vapor ou a gás que operam com velocidades elevadas, o mais adequado seria o de rotor liso, de dois ou quatro polos (UMANS, 2014).

Com a base de definição de que é uma máquina síncrona, e com a aplicação de um gerador conforme na Figura 46, verifica-se que é importante compreender os aspectos construtivos dela para ter o entendimento de como cada detalhe é essencial para haja confiabilidade na geração de energia e segurança nas operações.

A carcaça de um gerador de energia, no contexto de turbinas a vapor, é a estrutura fundamental que apoia, protege e oferece sustentação mecânica a todo o equipamento e ela é responsável por abrigar o núcleo magnético e os enrolamentos do estator, componentes cruciais para a geração de eletricidade. Em termos de construção, essas carcaças são tipicamente feitas de duas formas principais, podendo ser construídas com chapas e perfis de aço soldados, garantindo robustez e durabilidade, ou fabricadas em ferro fundido, material conhecido por sua solidez e capacidade de amortecer vibrações. Na Figura 47, ilustra-se a carcaça de um gerador (WEG - TGM, 2024).

Figura 46 – Gerador síncrono.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

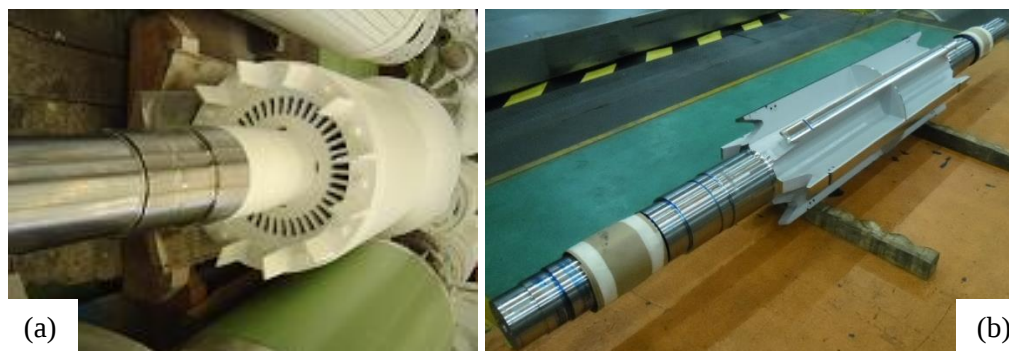
Figura 47 – Carcaça do Gerador síncrono.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

O eixo do gerador possui uma função primordial que é a de transmitir o torque para o rotor do gerador e através dele que a energia mecânica de rotação da turbina se converte em energia elétrica. Em termos de construção, os eixos de geradores podem ser encontrados em duas formas principais, sendo o maciço que consiste em uma peça sólida de metal e o costelado e este possui um design com nervuras ou reforços, o que pode otimizar a relação entre resistência e peso. Na Figura 48, ilustra-se a diferença entre as duas formas de construção do eixo (WEG - TGM, 2024).

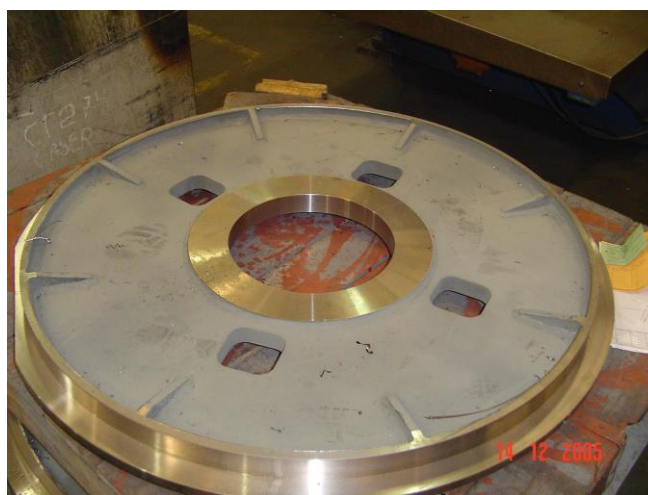
Figura 48 – Eixo maciço (a) e costelado (b).



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

As tampas da carcaça de um gerador de energia tem a função de suportar os mancais, que são os apoios do eixo do gerador, e por realizar o fechamento completo da carcaça, garantindo a proteção dos componentes internos. Elas são geralmente fabricadas de duas maneiras, podendo ser construídas com chapas e perfis de aço soldados ou ser feitas de ferro fundido, repetindo as características da carcaça. Na figura 49, ilustra-se um exemplo de tampa da carcaça de um gerador (WEG - TGM, 2024).

Figura 49 – Exemplo de tampa.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Considerando a estrutura do estator, da sua principal função é gerar força eletromotriz por meio da indução magnética e é nele que ocorre a transformação da energia mecânica em energia elétrica, conforme o campo magnético do rotor interage com seus enrolamentos. A construção dele envolve o empilhamento de chapas de aço silício. Estas chapas são prensadas ou soldadas por meio de tirantes para formar uma estrutura robusta que aloja os enrolamentos

e garante a estabilidade do campo magnético. Na Figura 50, ilustra-se um exemplo de estator (WEG - TGM, 2024).

Figura 50 – Exemplo de estator.

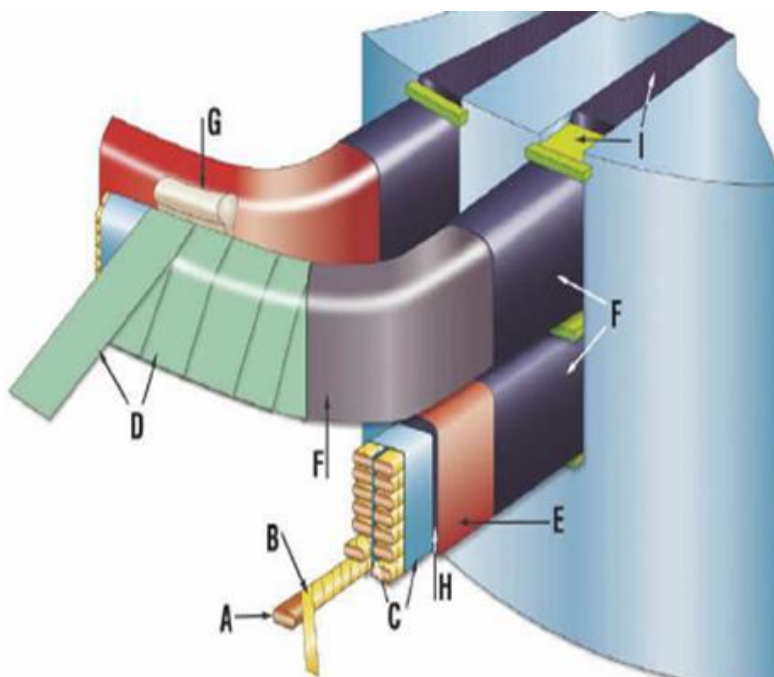


Fonte: (WEG - TGM, 2024).

O sistema de bobinagem de alta tensão em um gerador é composto por diversos elementos que trabalham em conjunto para garantir a eficiência e segurança e eles estão destacados na Figura 51 e para cada item tem-se condutor (a) e esta é a parte que transporta a corrente elétrica e ele é geralmente feito de cobre. O isolamento do condutor (b) é uma camada de material isolante que envolve o condutor para evitar que a corrente elétrica escape ou cause curtos-circuitos. A fita para consolidar as bobinas (c) e ela é utilizada para manter as diferentes partes da bobina firmemente unidas, garantindo sua forma e estabilidade mecânica. O isolamento principal (Mica) (d) que é considerado o coração do sistema de isolamento, pois a mica é um material com excelentes propriedades dielétricas, essencial para suportar as altas tensões geradas e prevenir descargas elétricas. A fita de acabamento (e) é uma fita externa que finaliza e protege o isolamento principal, dando um acabamento liso e uniforme à bobina. Tem-se a fita de proteção contra corona (f) que é essencial para a longevidade do gerador, porque esta fita previne o efeito corona, que é a ionização do ar ao redor de condutores de alta tensão, o que pode degradar o isolamento ao longo do tempo. A amarração (g) que consiste em elementos que prendem as bobinas firmemente dentro das ranhuras do estator, garantindo que elas não se desloquem devido às forças eletromagnéticas e vibrações. A resina de impregnação (h) e ela é uma resina líquida que preenche todos os vazios e espaços dentro da bobina e do isolamento, solidificando e criando uma estrutura monolítica, melhorando as

propriedades dielétricas e mecânicas, além de auxiliar na dissipação de calor. Os materiais de fechamento de ranhura (i) são componentes que mantêm as bobinas presas dentro das ranhuras do estator, assegurando que elas permaneçam na posição correta durante a operação (WEG - TGM, 2024).

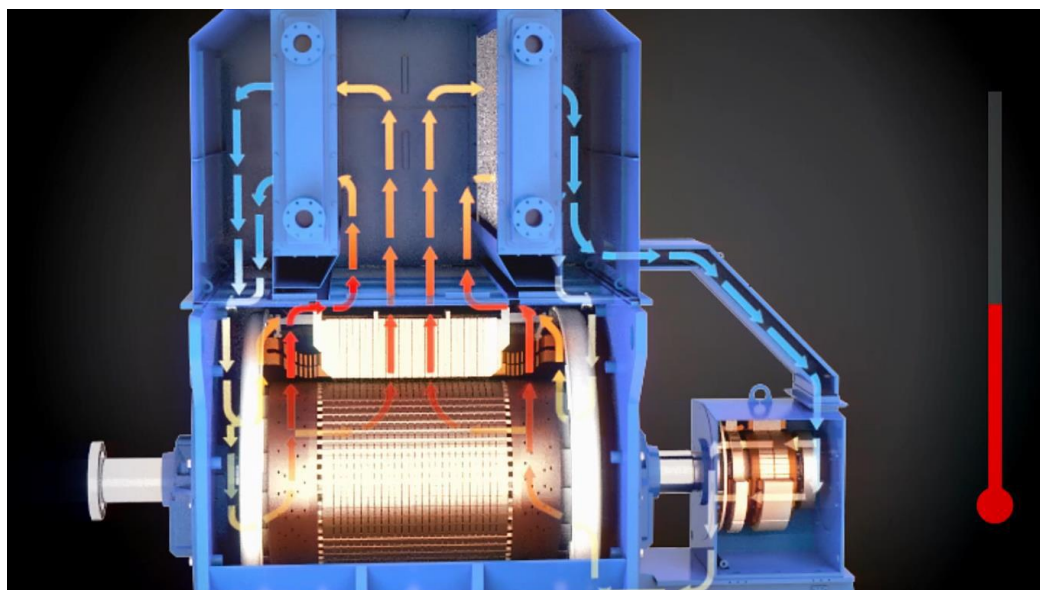
Figura 51 – O sistema de bobinagem de alta tensão.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Em um gerador de turbinas a vapor, as perdas de energia são inevitáveis e resultam na geração de calor e este precisa ser dissipado, ou seja, transferido para um elemento de resfriamento. Usualmente, utiliza-se o ar ambiente para essa finalidade e a forma como essa troca de calor ocorre entre as partes aquecidas do gerador define o sistema de ventilação da máquina. Existem dois tipos principais de sistemas de refrigeração para geradores sendo o aberto e neste sistema, o ar ambiente é diretamente utilizado para resfriar o gerador e, em seguida, é liberado de volta para a atmosfera. Tem-se também o totalmente fechado que diferentemente do sistema aberto, o ar circula dentro de um circuito fechado, sendo resfriado por trocadores de calor antes de ser reutilizado no gerador. Isso impede a entrada de impurezas externas e permite o uso mais eficiente do ar para o resfriamento. Na Figura 52, ilustra-se um exemplo do resfriamento fechado com trocador de calor com água (WEG - TGM, 2024).

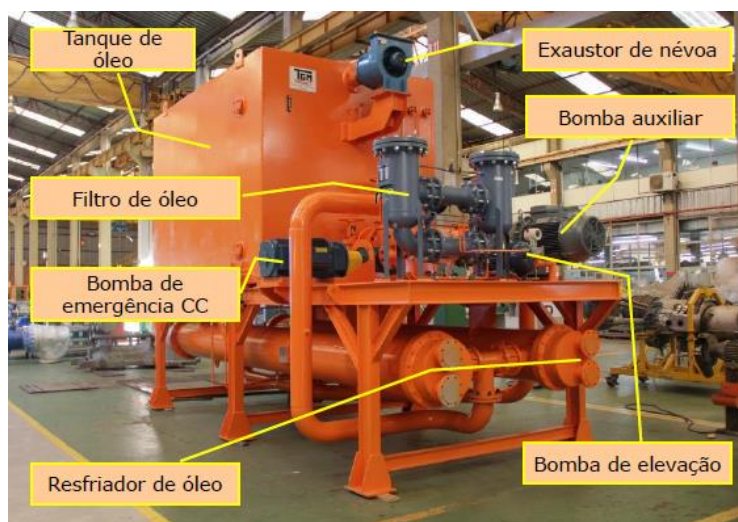
Figura 52 – Resfriamento.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

4.4 UNIDADE DE LUBRIFICAÇÃO

O sistema hidráulico de turbogeradores é fundamental para o funcionamento e a segurança da máquina, sendo composto por diversos elementos essenciais como o tanque de óleo, que armazena o fluido hidráulico. Para circular o óleo lubrificante, tem-se um conjunto de bombas sendo a bomba de óleo principal, que é acionada diretamente pelo redutor e em paralelo tem-se uma moto bomba auxiliar, com a mesma capacidade da principal, que serve como um reserva e, quando aplicável, uma moto bomba de emergência (ou turbo bomba de emergência), crucial para situações críticas. Se o projeto demandar, uma moto bomba de elevação do rotor também pode estar presente. Para manter a qualidade do ambiente e do óleo, um exaustor de névoa (quando aplicável) é utilizado para remover vapores de óleo. A temperatura do óleo é controlada por um trocador de calor, e um filtro é indispensável para remover partículas e outros depósitos da tubulação, garantindo a pureza do fluido. Opcionalmente, para garantir que o óleo atinja a temperatura mínima necessária antes do início da operação, um sistema de aquecimento de óleo pode ser incorporado. Há uma bomba de emergência tem um papel vital de segurança e ela é dimensionada especificamente para assegurar a lubrificação dos mancais em casos de paradas de emergência, principalmente se a bomba auxiliar não puder operar. Na Figura 53, ilustra-se a unidade hidráulica (WEG - TGM, 2024).

Figura 53 – Unidade hidráulica.

Fonte: (WEG - TGM, 2024).

O sistema hidráulico do turbogerador conta com um reservatório de óleo e este tanque é dividido por chicanas (chapas). Esta separação serve a um propósito duplo que é de individualizar a sucção das bombas de óleo e o retorno do óleo dos equipamentos para o tanque, forçando o óleo a circular por todo o reservatório antes de chegar à câmara de sucção. Esse processo é vital, pois impede que impurezas atinjam a câmara de sucção, auxilia no resfriamento do óleo em movimento e facilita o depósito de partículas de sujeira no fundo do tanque. As impurezas, uma vez decantadas, acumulam-se no fundo da câmara de retorno e o fundo do tanque é projetado com uma inclinação que direciona essas sujeiras para um ponto específico, tornando sua drenagem muito mais fácil. Para garantir a operação adequada, um visor de nível de óleo é estrategicamente posicionado, permitindo a monitoração contínua do nível de enchimento do tanque. Recomenda-se que a turbina seja iniciada com a temperatura do óleo no tanque acima de 38 °C. Caso essa condição não seja atendida, o tanque é equipado com uma resistência de aquecimento que deve ser acionada na partida para elevar a temperatura do óleo ao nível ideal (WEG - TGM, 2024).

Com o passar do tempo, o óleo lubrificante no gerador envelhece, o que naturalmente leva a uma maior formação de névoa de óleo e esta névoa precisa ser constantemente extraída e para isso, a unidade de extração de névoa de óleo é dimensionada para manter a linha de retorno de óleo dos mancais sob uma ligeira subpressão. Ela combinada com o fato de que a tubulação de retorno fica apenas parcialmente preenchida com óleo, facilita a separação da névoa do fluido, tornando sua remoção mais eficiente. Essencialmente, o exaustor de névoa é composto por dois elementos principais: um filtro de névoa de óleo e um exaustor

propriamente dito (WEG - TGM, 2024).

O sistema hidráulico do turbogerador inclui um resfriador de óleo, posicionado após as bombas e sua principal função é transferir o calor gerado nos mancais do gerador para a água de refrigeração. Esse resfriador é um trocador de calor do tipo casco/tubos, caracterizado por possuir um feixe tubular fixo, o que garante a eficiência da troca térmica e a manutenção da temperatura ideal do óleo lubrificante. Na Figura 54, ilustra-se o trocador de calor (WEG - TGM, 2024).

Figura 54 – Trocador de calor.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Logo após o resfriador de óleo, é instalado um filtro duplo com um grau de filtragem de 25 micrômetros (μm) e a principal vantagem desse *design* duplo é que ele é intercambiável em operação, ou seja, é possível trocar um elemento filtrante sujo enquanto o outro continua em funcionamento, garantindo a continuidade da filtragem sem interromper o fluxo de óleo. A comutação entre os filtros é feita de forma prática, através de um volante que aciona duas válvulas tipo prato. Essas válvulas são abertas e fechadas simultaneamente, assegurando uma transição suave e sem qualquer interrupção no fluxo de óleo, o que é crucial para a operação contínua e segura do turbogerador. Na Figura 55, ilustra-se os filtros duplos (WEG - TGM, 2024).

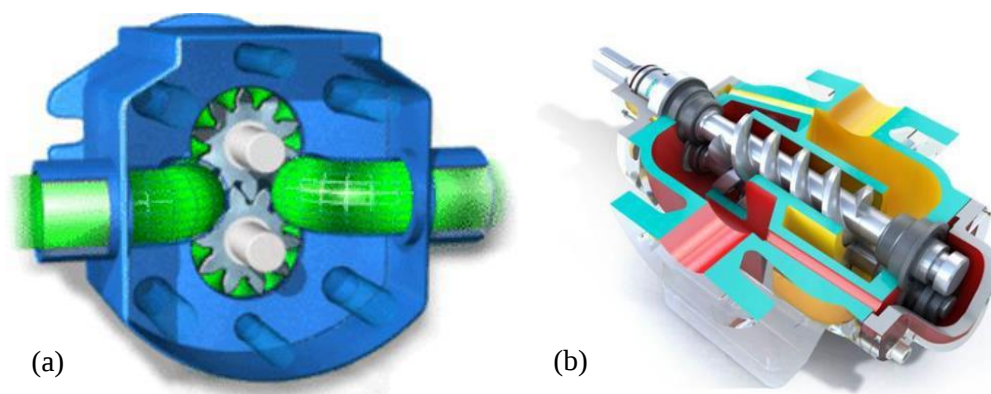
Figura 55 – Filtros duplos.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Analisando as bombas, a principal e a auxiliar podem ser do tipo fusos ou engrenagens como na Figura 56, enquanto a bomba de emergência é tipicamente do tipo engrenagens. A bomba principal é acionada diretamente pelo redutor, garantindo que a lubrificação seja fornecida assim que o conjunto começa a operar. Já a bomba auxiliar é acoplada a um motor elétrico que durante a partida do turbogerador, é a responsável por manter a lubrificação e a regulação do sistema. Uma vez que o conjunto atinge a operação normal, a bomba principal assume e supre todo o sistema de óleo. Em caso de uma parada ou se a pressão de lubrificação cair, ou ainda se houver algum problema com a bomba principal, a bomba auxiliar liga automaticamente, garantindo a continuidade da lubrificação. Para situações de emergência mais graves, onde tanto o sistema principal quanto a moto-bomba auxiliar falham, uma bomba de emergência é acionada para assegurar a lubrificação dos mancais do turbogerador durante a parada da turbina. Por fim, a bomba de drenagem do tanque é utilizada especificamente quando não é possível drenar as linhas do filtro e do trocador de calor por gravidade, garantindo a manutenção e limpeza do sistema de óleo (WEG - TGM, 2024).

Figura 56 – Bomba engrenagem (a) e de fusos (b).



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Por fim, comentando sobre o giro-lento, sua principal função em um gerador é garantir a integridade do equipamento, pois quando a turbina é desligada, seja por uma parada programada ou por algum motivo inesperado, o giro lento garante que o rotor continue girando a uma velocidade reduzida e isto é fundamental para que o rotor atinja uma temperatura uniforme e segura, evitando o empenamento que poderia ocorrer se ele parasse completamente e esfriasse de forma desigual. Na Figura 57, ilustra-se este componente (WEG - TGM, 2024).

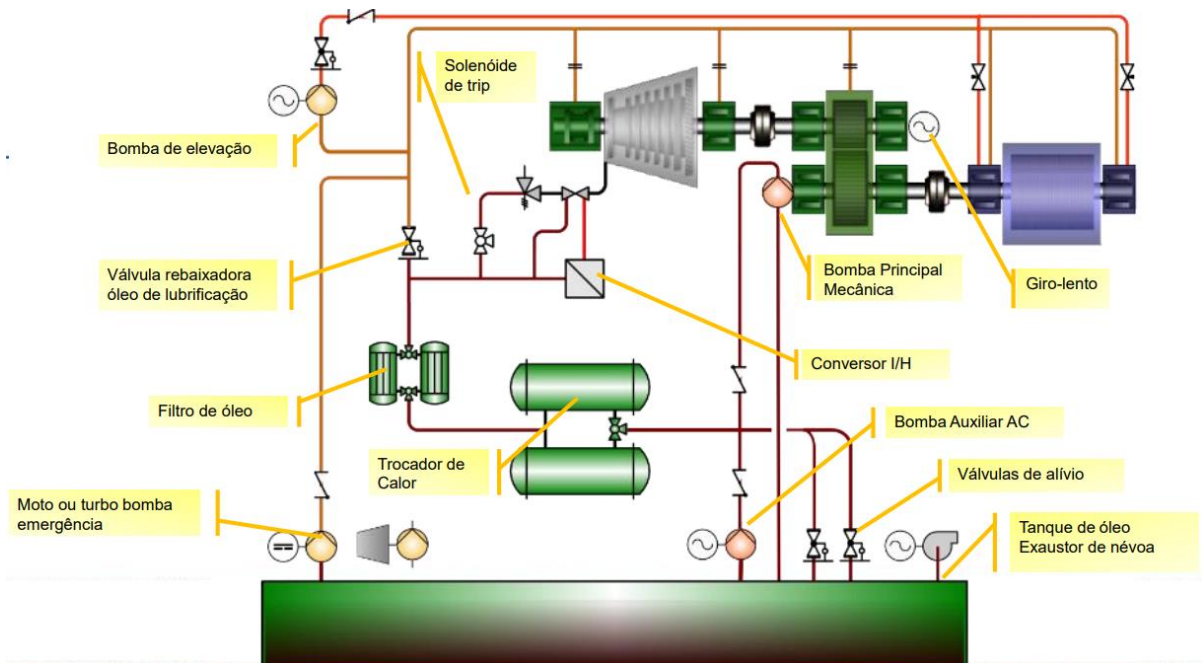
Figura 57 – Giro-lento.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Na Figura 58, está presente um esquema que interliga como o sistema de lubrificação está interligado com as estruturas da turbina, redutor e gerador (WEG - TGM, 2024).

Figura 58 – Esquema do turbogerador com a unidade hidráulica.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

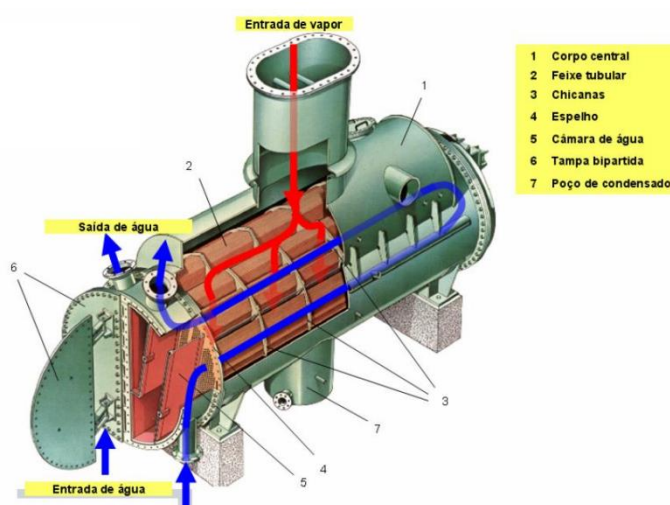
4.5 CONDENSADOR

O condensador é um elemento presente em turbogeradores de condensação, e sua função é garantir a condensação do vapor de exaustão da turbina, e fazer com que haja um melhor aproveitamento energético do vapor isto devido a formação de um vácuo no seu interior, que faz com que variação de entalpia da entrada com relação a saída seja maior, e isto tem como resultado uma melhor eficiência do turbogerador. Na Figura 59, ilustra-se o condensador e na Figura 60, o conjunto de elementos que auxiliam na geração de vácuo e na remoção de incondensáveis no interior do condensador (SANTOS, 2012).

Considerando o caminho do vapor, este da exaustão da turbina adentra no condensador e se condensa ao entrar em contato com a superfície externa de tubos trocando calor. Os tubos, internamente, são resfriados por água de refrigeração circulante, sendo esta proveniente de uma torre de resfriamento e estes tubos, são projetados com elevada resistência à erosão e corrosão, isto pois além da constante exposição de sua superfície externa ao vapor e a gases incondensáveis arrastados, e estes possuem propriedades corrosivas, os tubos têm que resistir a possíveis contaminantes na água de resfriamento da torre (SANTOS, 2012).

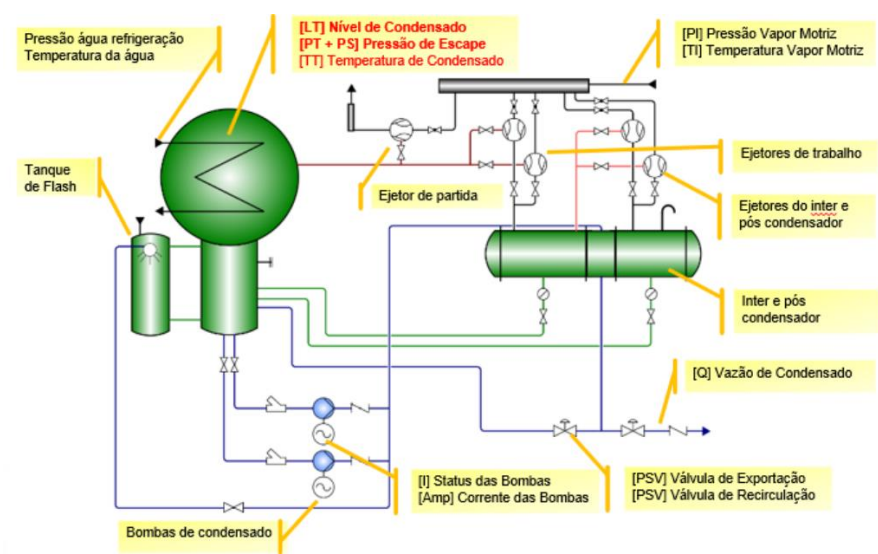
Um dos mecanismos responsáveis para remover continuamente os gases não condensáveis do interior do condensador, é o ejetor, conforme ilustrado na Figura 61 e esta remoção é importante para a garantia de um vácuo, pois a maximização do vácuo permite que seja aproveitado potencial energético do vapor na turbina. Alterações no vácuo, ou na qualidade do trocador de calor, prejudica a eficiência térmica do conjunto turbogerador de condensação (WEG - TGM, 2024).

Figura 59 – Esquema do condensador.



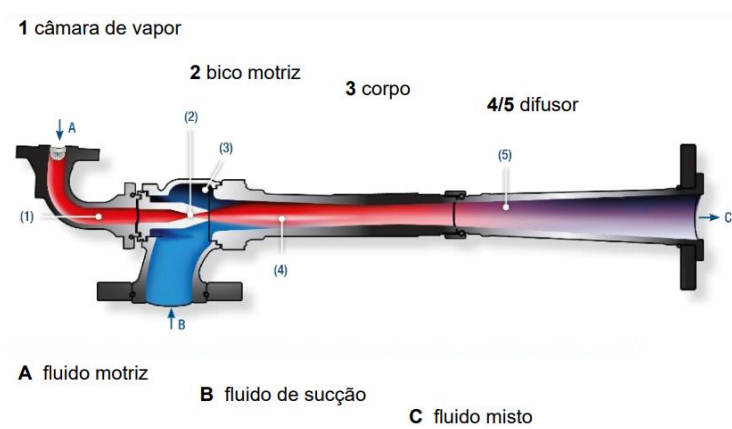
Fonte: (SANTOS, 2012).

Figura 60 – Esquema do conjunto do condensador.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Figura 61 – Ejetor.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

5 PROTEÇÃO E CONTROLE DE TURBOGERADORES

A proteção de turbogeradores como um componente vital em sistemas de geração de energia, este sistema é equipado com uma série de dispositivos de segurança, proteção e advertência. Eles são estrategicamente posicionados, assegurando a integridade da turbina e de seus componentes, dos equipamentos associados e, fundamentalmente, a segurança dos operadores. São projetados para monitorar continuamente o funcionamento do turbogerador, acionando-se instantaneamente ao detectar qualquer anomalia. Apesar de suas funções e localizações distintas, o objetivo comum desses dispositivos é prevenir danos de qualquer natureza e dependendo da sua criticidade, é imperativo que esses dispositivos estejam em excelente estado de funcionamento, com sua manutenção realizada periodicamente por profissionais especializados. Embora interligados em certas circunstâncias, os dispositivos de proteção e segurança operam de forma independente, cada um com suas próprias características, funções e limites predefinidos no campo (TGM TURBINAS, 2008).

Entre os componentes de proteção mais importantes, destacam-se as válvulas de fecho-rápido, presentes tanto na admissão quanto na extração e/ou tomada, e eles são cruciais para interromper o fluxo de forma quase instantânea em situações de emergência, controlando o abastecimento ou a saída de fluidos essenciais para a operação da turbina. Tem-se também, as válvulas solenoides, também localizadas na admissão e extração e/ou tomada, são acionadas eletricamente, permitindo um controle rápido e preciso para abrir ou fechar a passagem de fluidos com base nos sinais do sistema de controle. Um recurso de segurança existente é o bloqueio manual, que permite a intervenção humana direta, pois em qualquer situação de emergência, um operador pode acionar este bloqueio prevenindo danos maiores ou acidentes. Para a integridade da turbina, a proteção contra sobrevelocidade monitora constantemente a rotação do equipamento e se a turbina começar a girar acima dos limites de segurança predefinidos, o sistema atua para reduzir a rotação ou desligar o equipamento, evitando falhas catastróficas (TGM TURBINAS, 2008).

Há uma proteção contra deslocamento axial que detecta e evita movimentos excessivos do eixo da turbina ao longo de seu próprio eixo. Deslocamentos anormais podem indicar problemas de desgaste ou falhas nos mancais, e esta proteção aciona alertas ou desligamentos para evitar danos. Caso haja vibrações excessivas, estes que são frequentemente relacionados a desbalanceamento, desalinhamento ou outros problemas mecânicos e desta forma, a proteção contra altos níveis de vibração monitora tais amplitudes e, ao excederem os limites seguros, pode emitir alertas ou até mesmo desligar o turbogerador

para evitar danos estruturais (TGM TURBINAS, 2008).

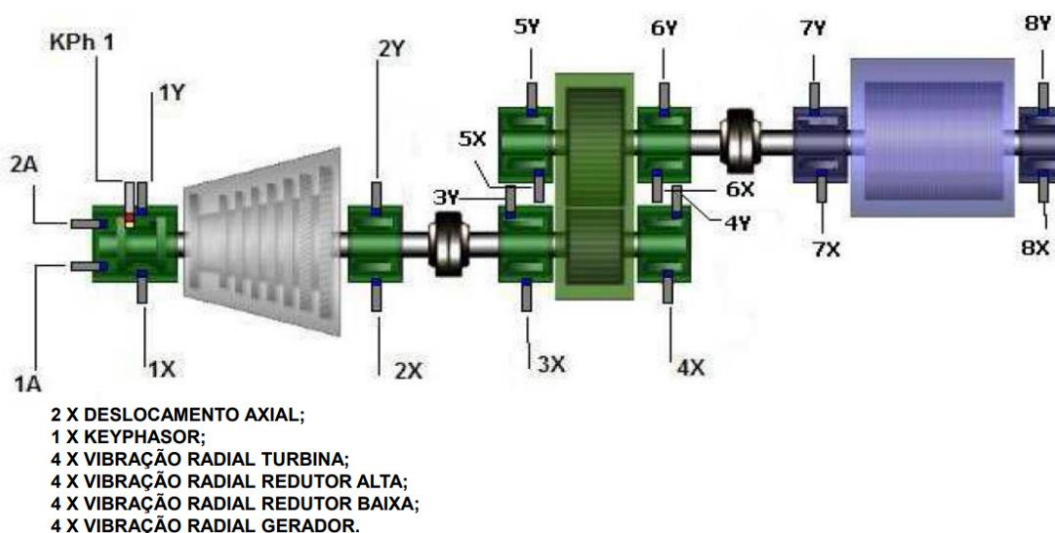
Sensores são instalados em diversos pontos críticos do turbogerador e monitoram continuamente a temperatura e a pressão dos fluidos e componentes. As proteções de temperatura e pressão atuam se esses parâmetros saírem das faixas operacionais seguras, acionando alarmes ou desligando o equipamento para evitar superaquecimento, rupturas ou outras falhas (TGM TURBINAS, 2008).

Por fim, a proteção contempla os botões de emergência e eles são dispositivos facilmente acessíveis que permitem a parada imediata do turbogerador em caso de qualquer risco iminente ou situação de perigo (TGM TURBINAS, 2008).

5.1 LOCALIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO NO TURBOGERADOR

Antes da compreensão dos dispositivos de segurança, deve avaliar o mapeamento de sensores disponíveis para que os dados coletados por eles, sirvam de entradas de sinal para atuação da proteção da máquina. Na Figura 62, ilustra-se o posicionamento dos sensores de vibração no conjunto turbogerador.

Figura 62 – Sensoriamento de vibração.



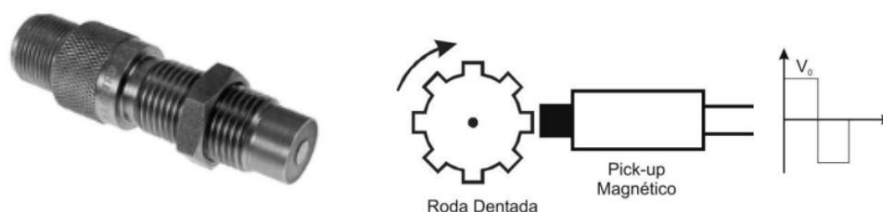
Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Um dos dispositivos aplicados na proteção de vibração é a sonda de proximidade, também conhecida como *proximity probe*. E ele é um sensor multifuncional para monitorar diversos parâmetros críticos de maneira contínua e sem contato físico com as partes rotativas da máquina. A sonda de proximidade é utilizada para medir vibração radial, pois detecta o

movimento lateral do eixo do turbogerador, indicando possíveis desbalanceamentos, desalinhamentos ou outros problemas mecânicos que causam vibrações. Mede também o deslocamento axial, o “*Keyphasor*”, sendo esta função identificar um ponto de referência específico na rotação do eixo, permitindo que os sistemas de monitoramento sincronizem as medições de vibração com a posição angular do rotor. Por fim a sonda de proximidade pode medir a excentricidade do eixo, que é a medida de quão fora do centro o eixo está em relação ao seu ponto de rotação ideal e ele é especialmente aplicado para observar se durante a partida ou parada da turbina, há indícios de empenamento do eixo (WEG - TGM, 2024).

No contexto da medição de velocidade angular em turbogeradores, o *Pick-up* Magnético (MPU), também conhecido como sensor de relutância variável, é um dispositivo fundamental para a determinação precisa da rotação do eixo e o princípio de operação do MPU baseia-se na geração de uma força eletromotriz (FEM) induzida por variação do fluxo magnético. O sensor é composto por um ímã permanente e um enrolamento de bobina e desta forma quando um material ferromagnético, tipicamente um dente de engrenagem ou um alvo ranhurado (roda fônica) fixado ao eixo rotativo do turbogerador, interage com o campo magnético estático do MPU, ocorre uma perturbação no fluxo magnético através do enrolamento. Esta variação no fluxo magnético induz, de acordo com a Lei de Faraday da indução eletromagnética, uma tensão alternada (FEM) nos terminais do enrolamento e a amplitude e a frequência dessa tensão induzida são diretamente proporcionais à velocidade relativa do material ferromagnético passando pelo campo, ou seja, a frequência dos pulsos de tensão gerados é uma função linear da velocidade de rotação do eixo. Na Figura 63, ilustra-se este sensor (WEG - TGM, 2024).

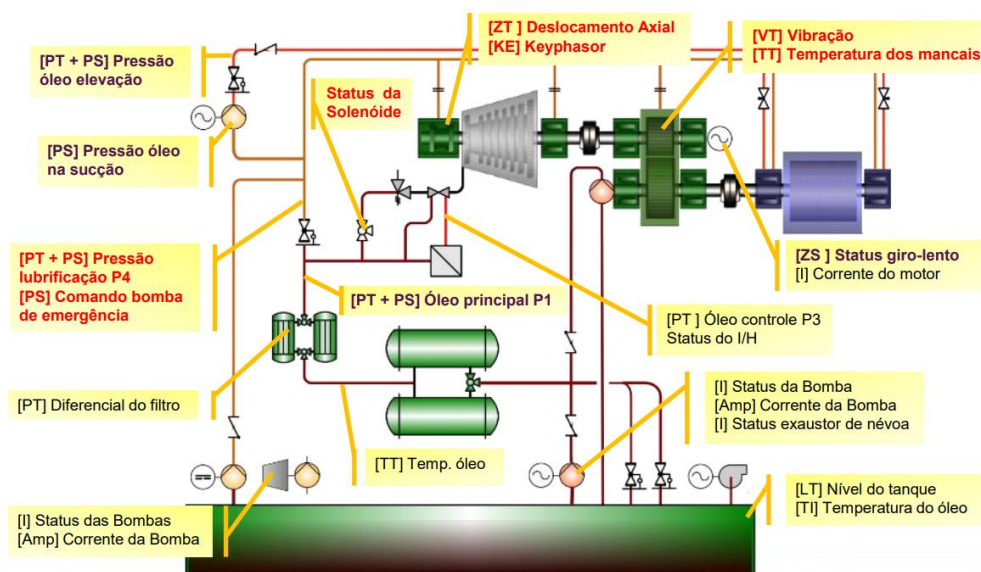
Figura 63 – Pick-up Magnético (MPU).



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

Com relação a operacionalidade, na Figura 64, ilustra-se algumas grandezas para serem medidas como a de pressão, temperatura, potência elétrica, tensão, corrente elétrica e sinal de *status*.

Figura 64 – Grandezas medidas em um turbogerador.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

5.2 FECHO-RAPIDO

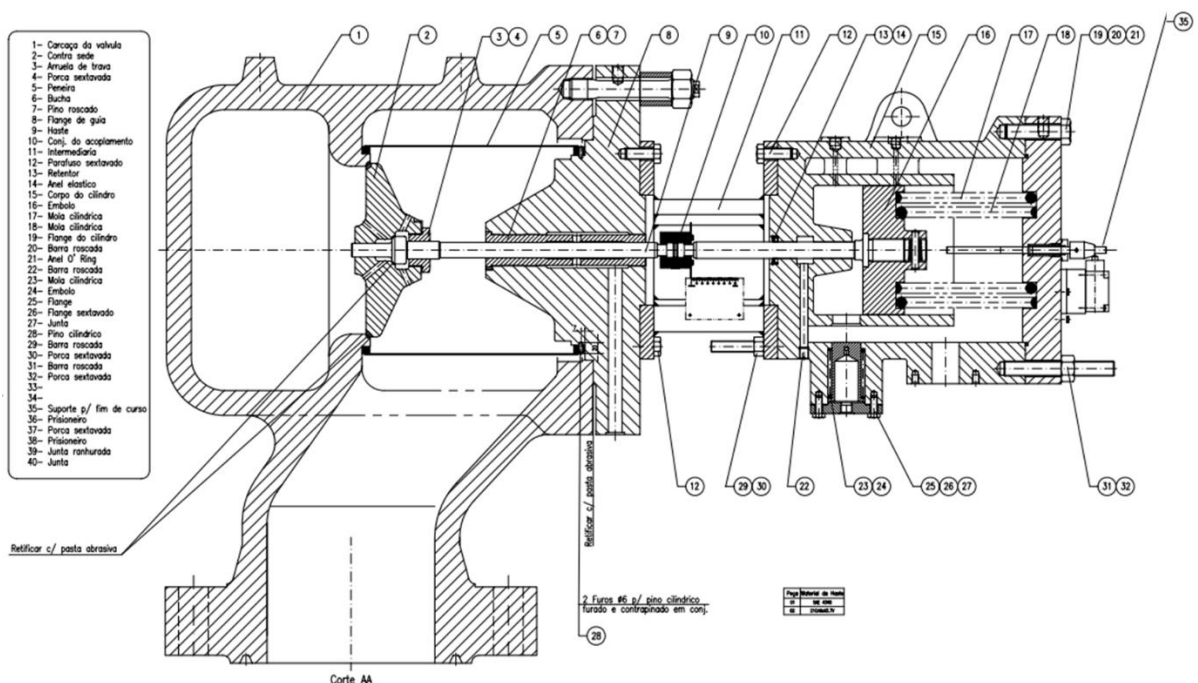
A válvula de fecho rápido, como ilustrado na Figura 65, é um componente que está acoplado ao bloco de válvulas na parte superior da turbina. Sua função é atuar como a primeira barreira de controle do fluxo de vapor e isto é possível pois o vapor passa por ela antes de seguir para o sistema de regulação e para as palhetas da turbina. A principal característica da válvula de fecho rápido é sua capacidade de promover uma "parada rápida" da turbina e por isso, diversos dispositivos de segurança podem atuar sobre ela, fechando-a instantaneamente em caso de emergência. Isso é vital para prevenir danos à turbina e outros equipamentos em situações anormais (TGM TURBINAS, 2008).

Além de sua função de parada de emergência, essa válvula também permite que o operador libere o vapor gradativamente, controlando o processo de partida da turbina. Essa liberação controlada é essencial para evitar que a turbina atinja altas rotações de forma abrupta, o que poderia causar estresse excessivo e risco de falhas (TGM TURBINAS, 2008).

Considerando a sua operação, inicialmente, ao se pressurizar a linha de vapor vivo, o vapor se encaminha para dentro da válvula e depara-se com a peneira de vapor (5) que filtra o vapor antes que este preencha a câmara, pois a contrassede (2) da válvula ainda está fechada. A pressão de óleo P1 (Pressão de alimentação) desloca o êmbolo (16) até a sua sede, bloqueando dessa forma o retorno de óleo da câmara anterior ao pistão (TGM TURBINAS,

2008).

Figura 65 – Fecho rápido.



Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

Essa câmara pressurizada desloca o pistão (24) até a sua sede no cilindro de forma a vedar o retorno de óleo da câmara entre o pistão e êmbolo (TGM TURBINAS, 2008).

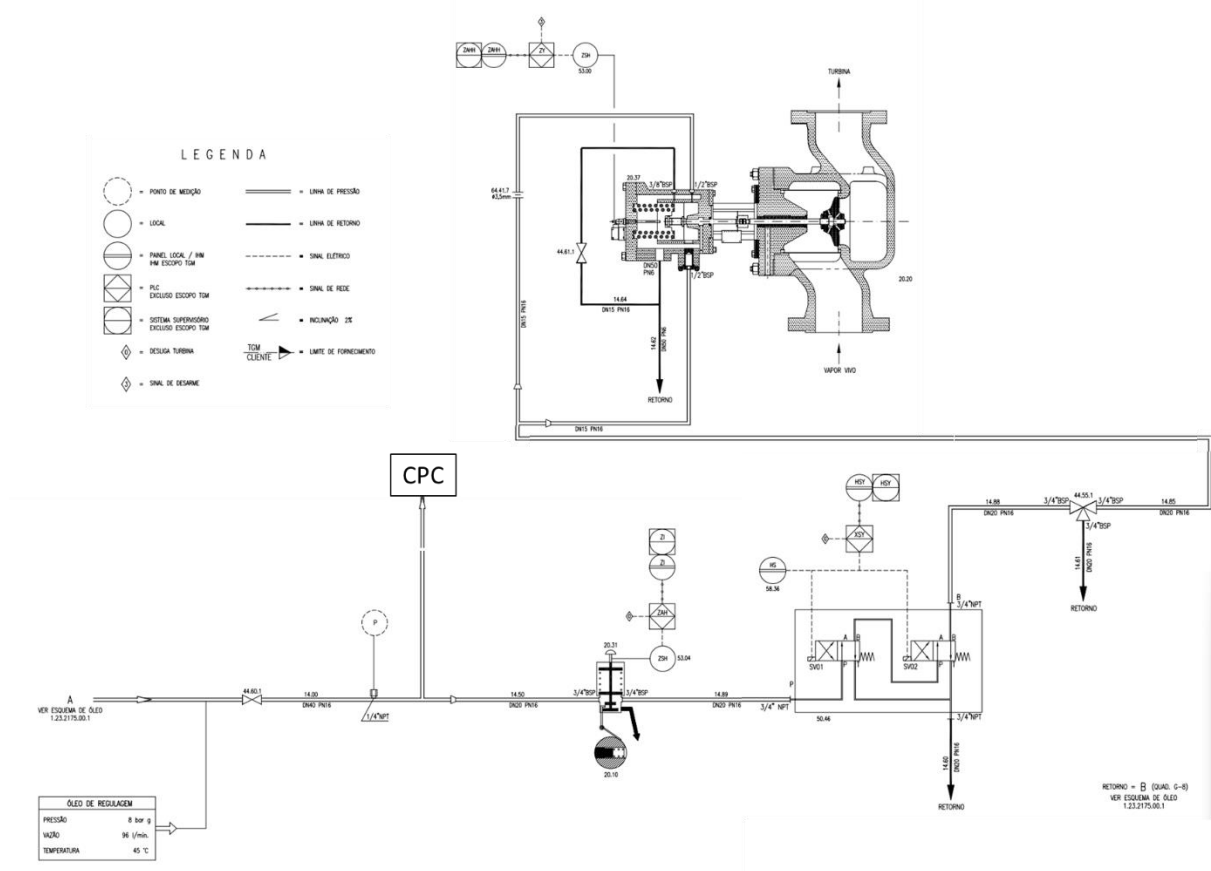
Este cilindro hidráulico que atua na válvula é caracterizado por ser robusto e de simples construção possibilitando sua aplicação. O pistão se manterá nessa posição devido à diferença de área proveniente de sua forma construtiva. O êmbolo irá se movimentar no sentido de abrir a válvula de fecho rápido. Primeiramente é aberto o pré-curso, fazendo que a haste (9) se desloque até apoiar-se na porca. O vapor pode então passar pelos orifícios da contrassede (2) para dentro das válvulas de regulação, equalizando as pressões de vapor antes e depois da contrassede e este balanço de pressão não é possível se as válvulas de regulação não estiverem suficientemente seladas e as válvulas de drenagem da carcaça fechadas. O êmbolo é dimensionado de forma que toda a pressão de óleo não seja suficiente para abrir a válvula, enquanto não houver o equilíbrio de pressões antes e depois da contra-sede. Quando houver uma parada de emergência, a pressão de óleo P1 é cortada, o êmbolo retorna à sua posição inicial, despressurizando a câmara que mantinha o pistão vedando a passagem de óleo para retorno. Sobre a ação da mola cilíndrica a válvula, incluindo o pré-curso, fecha em aproximadamente 0,1 – 0,2 s, devido à abertura de uma grande área de descarga do pistão (TGM TURBINAS, 2008).

5.3 VÁLVULA SOLENOIDE

Outro dispositivo importante para segurança da turbina é usado no circuito hidráulico também atuando sobre a válvula de fecho rápido para o desarme de emergência e na Figura 66, ilustra-se o esquemático da passagem de óleo em que esse dispositivo é aplicado. Quando a bobina é energizada, o êmbolo sai da posição de repouso e sobe dando passagem de óleo para o cilindro da válvula de fecho rápido. Ao ser desenergizada, o êmbolo desce bloqueando a passagem de óleo para o cilindro simultaneamente liberando o óleo da linha e do cilindro para retorno. Nesta operação, o desarme da turbina é instantâneo. Como a válvula solenoide é um dispositivo que permite facilmente ser acionado por sinal elétrico, é através dela que são interligados vários outros dispositivos de desarme de emergência, como o botão de emergência, cujo esquema de ligação esta na Figura 67 do tipo “cogumelo” que fica montado no painel de controle e no painel central é acionado manualmente. Outro dispositivo é o fim de curso que é montado na extremidade do cilindro de fecho rápido e é acionado mecanicamente pela haste da válvula de fecho rápido no fechamento da válvula a fim de se desarmar o gerador por impulsos elétricos. Por fim, pode ter interação com os pressostatos que são montados no painel de controle e no “rack”, ilustrado na Figura 68 e emitem sinais elétricos para solenoide assim que a pressão na linha da bomba ou a pressão de lubrificação atinjam valores abaixo dos permitidos (TGM TURBINAS, 2008).

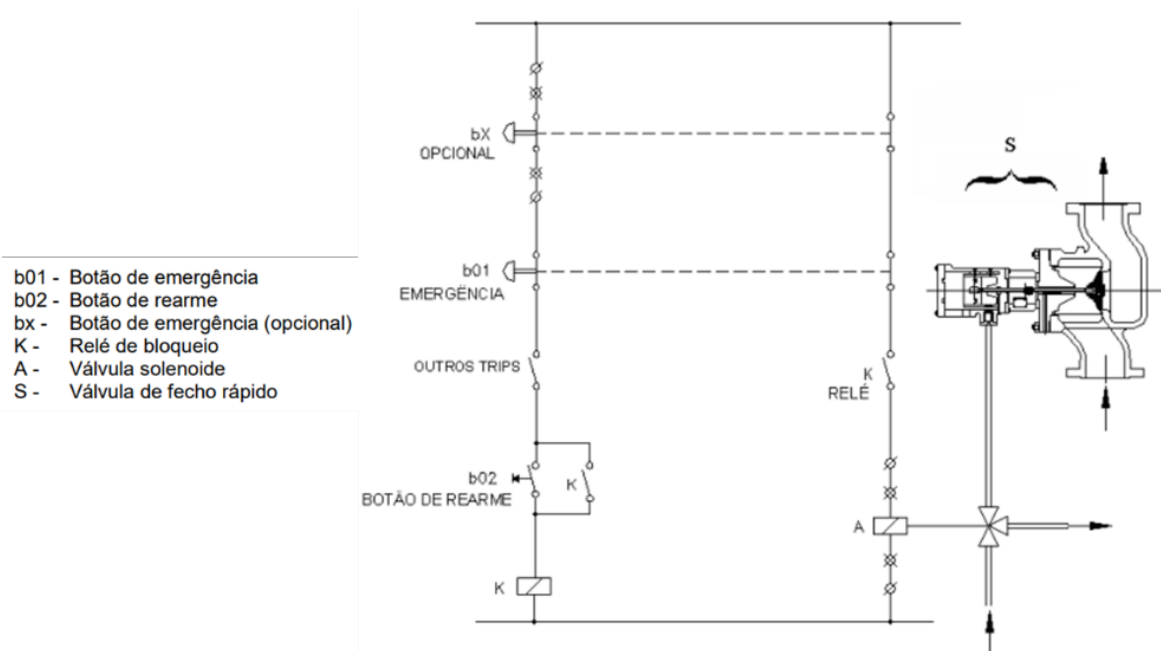
O sistema contém também uma válvula de acionamento manual para desarmar o conjunto caso haja algum problema com os outros dispositivos de segurança. A válvula manual 3 vias também é montada na linha onde se alimenta o cilindro da válvula de fecho rápido. Assim que detectado algum problema, estando o operador próximo à turbina, pode-se desarmá-la com um simples movimento, girando a alavanca da válvula, bloqueando a passagem de óleo e parando a turbina (TGM TURBINAS, 2008).

Figura 66 – Esquema de interação entre dispositivos e fecho rápido.



Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

Figura 67 – Esquema de interação entre botoeiras e fecho rápido.



Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

Figura 68 – Exemplo de “Rack” dos pressostatos.



Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

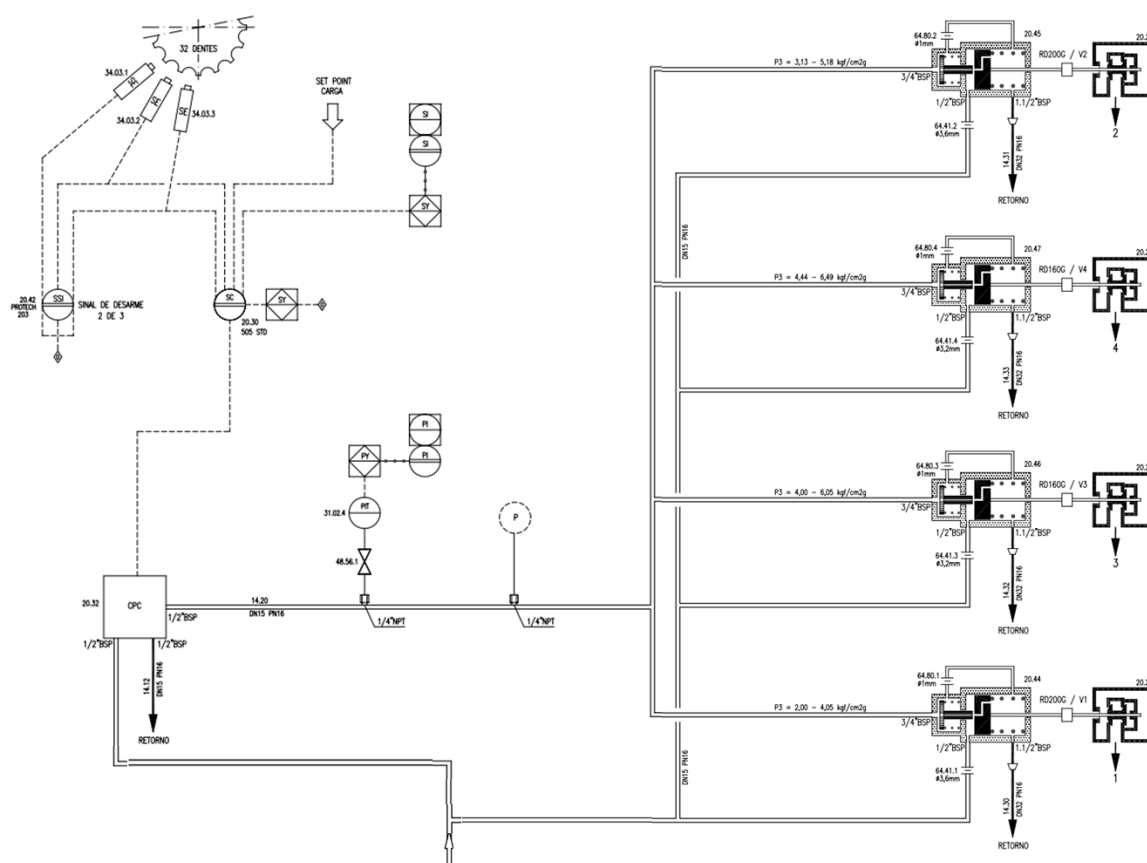
5.4 VÁLVULA DE REGULAGEM

O conjunto denominado por válvulas de regulagem tem por objetivo controlar, de acordo com a necessidade de carga, a quantidade de fluxo de vapor a ser enviado ao interior da turbina. Estas válvulas são compostas de servomotores hidráulicos que atuam sob impulso de óleo regulado, liberando o fluxo de vapor em quantidades calculadas e distribuídas, conforme seus respectivos grupos. O sistema basicamente hidráulico é acionado assim que os servomotores, acoplados às hastes das válvulas pelo acoplamento, recebem do regulador de velocidade um impulso de óleo regulado (P3). À medida que este impulso começa a atingir a faixa pré-estabelecida de pressão (aproximadamente 2 a 4 bar g), os servomotores começam a atuar movendo as hastes das válvulas no sentido de abertura fazendo com que o vapor já liberado pela válvula de fecho rápido, passe para o interior da máquina até os grupos injetores. Este movimento, estando a máquina em operação, varia abrindo ou fechando a válvulas conforme a solicitação de carga interpretada e transmitida pelo regulador. O curso de abertura das válvulas é indicado por um disco fixo ao acoplamento que se movimenta em operação, sobre uma escala ou plaqueta graduada fixada na intermediária da válvula. Na Figura 69, ilustra-se o esquema complementar do da Figura 66 (TGM TURBINAS, 2008).

A carcaça do bloco de válvulas possui em seu interior divisões de câmaras capazes de individualizar o fluxo de vapor por grupos, de acordo com a vazão requerida pelo grupo injetor respectivo. São fixados às paredes destas câmaras, os cestos das válvulas que servem como guia da haste de sede para vedação do vapor. A haste também é guiada por uma bucha

especial montada no flange de guia interligada através de orifícios com a câmara de drenagem. O cesto, a haste e a bucha são fabricados em aço inoxidável de alta resistência e alta temperatura, além de receber tratamento térmico e superficial, aumentando sua resistência à corrosão e ao desgaste por atrito (TGM TURBINAS, 2008).

Figura 69 – Esquema de interação entre o CPC e as válvulas de regulagem.



Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

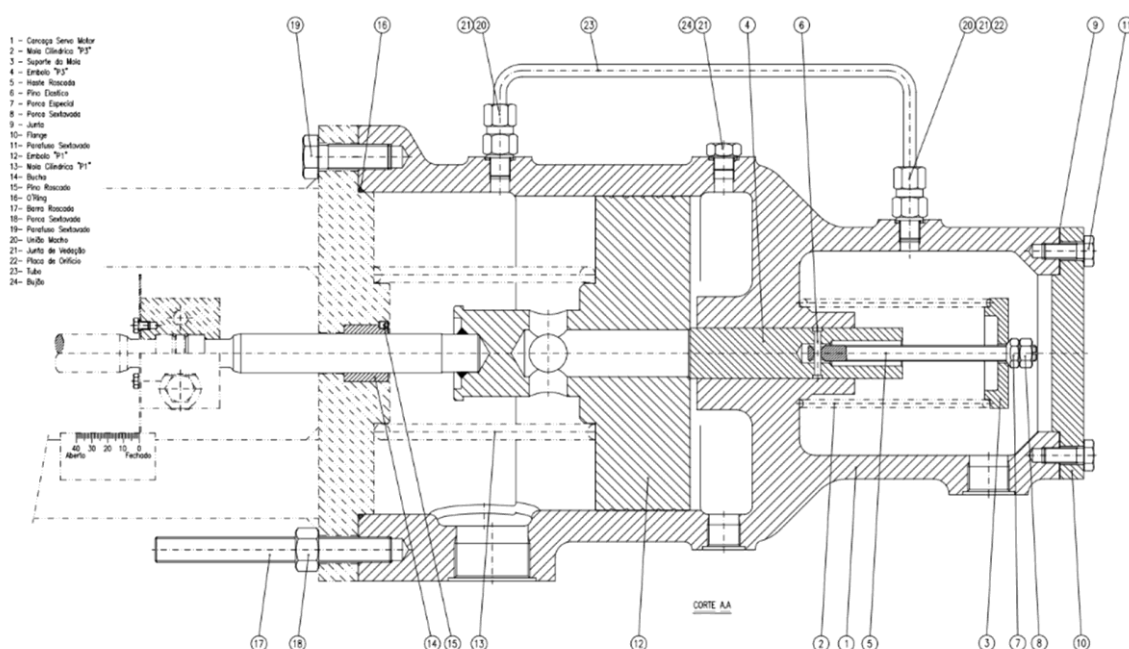
5.5 SERVOMOTOR

Os servomotores são o elo de união entre o regulador de velocidade e as válvulas reguladoras de vapor e eles são responsáveis pelo correto posicionamento das válvulas, tendo uma atuação ser precisa e isenta de oscilações. Os servomotores operam segundo o princípio da retroalimentação, ou seja, para cada posição do êmbolo piloto há apenas uma posição do pistão, assim qualquer eventual desvio é autocompensado. Na Figura 70, ilustra-se sua construção (TGM TURBINAS, 2008).

Baseado na Figura 5.9, tem-se a carcaça (1) que está dividida em duas câmaras separadas sendo uma onde está montado o pistão (12), que aciona a haste da válvula e na outra o êmbolo piloto (4), que recebe o impulso (P3) do regulador. O pistão (12) é guiado pela própria carcaça (1) e pela bucha (14), enquanto o êmbolo piloto (4) é guiado somente pela carcaça. As molas (13) e (2) forçam o pistão e o êmbolo piloto, respectivamente, no sentido de manter a válvula fechada quando o sistema está despressurizado. A tubulação (23) é uma desaeração permanente da câmara do êmbolo piloto (TGM TURBINAS, 2008).

Com relação ao seu funcionamento, a pressão de impulso (P3), oriunda do regulador, atua sobre o êmbolo piloto (4), contra a força da mola, forçando-o a deslocar para a esquerda na procura de uma posição de equilíbrio. Ao se aproximar do pistão o êmbolo piloto faz com que a pressão do óleo (P1) admitido através da placa de orifício aumente na câmara do pistão, fazendo com que ele se desloque para a esquerda. Afastando-se do pistão, ocorre o inverso. A posição relativa entre os dois é definida por uma distância de apenas alguns centésimos de milímetro, com o que se garante excepcional estabilidade e precisão de atuação, sendo o curso de acionamento das válvulas de vapor proporcional à pressão de impulso P3 (TGM TURBINAS, 2008).

Figura 70 – Esquema de servomotor.



Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

5.6 RELÉ SEL-300G

O relé de proteção, como o SEL-300G Generator Relay, tem como objetivo de salvaguardar a máquina, os equipamentos associados e a rede elétrica contra condições de operação anormais e falhas. O SEL-300G é explicitamente descrito como um relé abrangente e multifuncional destinado à proteção primária e/ou de backup para máquinas síncronas de qualquer porte. Essa abrangência e flexibilidade garantem que ele possa identificar e isolar rapidamente condições que poderiam levar a danos severos ou a interrupções prolongadas, protegendo o investimento, minimizando custos de reparo e otimizando a disponibilidade do sistema. O SEL-300G traz uma série de benefícios operacionais e econômicos, justificados por suas características técnicas e ele auxilia na confiabilidade do ativo, embora o data sheet não forneça tempos de atuação específicos para cada função aqui, a designação de "relé de proteção" implica tempos de resposta na ordem de ciclos de sistema (ms), minimizando o tempo de exposição a condições de falha e prevenir a escalada de problemas menores para danos maiores. Ele apresenta um diagnóstico aprimorado com recursos de monitoramento e medição que são cruciais para a análise pós-falha e manutenção preditiva. Isso inclui relatórios completos de eventos ("*Full Event Reports*"), o registrador sequencial de eventos ("*Sequential Events Recorder (SER)*") e medição de alta precisão ("*High-Accuracy Metering*"). Estas características, fornecem dados para uma visão detalhada do que ocorreu antes, durante e depois de um evento de falha. Sua comunicação avançada é baseado no ASCII, Binária e Modbus através de portas "EIA-232 e/ou EIA-485", além de "Entrada de Código de Tempo IRIG-B" ("*IRIG-B Time Code Input*"). Isto facilita a integração com sistemas de controle e supervisão (SCADA), permitindo a coleta remota de dados e o controle da máquina, e garante a sincronização precisa de eventos (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2021).

O SEL-300G Generator Relay é projetado para identificar e atuar sobre uma ampla variedade de condições de falha que podem ocorrer em um turbogerador, conforme detalhado em suas "*Features - Protection*" e correlacionado com a numeração padrão ANSI (American National Standards Institute) para relés de proteção, verifica-se algumas falhas, como (64S): Proteção contra falhas de aterramento que afeta o estator; (64F) que é a detecção de falhas de aterramento no enrolamento de campo (rotor), exigindo a integração com o módulo externo SEL-2664 *Field Ground Module*; (87G / 87N) que é a proteção diferencial que compara as correntes nas extremidades dos enrolamentos do estator para identificar falhas internas, seja entre fases (87G - Gerador Diferencial) ou para o aterramento (87N - Neutro Diferencial);

(24) que é a proteção contra a sobre-excitação do gerador (relação V/Hz excessiva), que pode ocorrer quando a relação tensão/frequência excede limites seguros, saturando o núcleo da máquina; (32R / 37) que é a detecção de condições de potência anormal, como o gerador atuando como motor (32R - Potência Reversa) ou operando com uma potência ativa de saída muito baixa (37 - Subpotência); (50 / 51) que é a proteção de sobrecorrente temporizada (51) e instantânea (50); (46) que é a proteção contra correntes de sequência negativa, que indicam desequilíbrios de fase na rede e podem causar superaquecimento localizado e danos significativos ao rotor do gerador; (40) que é a detecção da perda de excitação no campo do gerador, uma condição que pode levar à perda de sincronismo; (81O / 81U) que é o monitoramento e proteção contra desvios significativos na frequência do sistema, tanto para valores acima (81O - Sobrefrequência) quanto abaixo (81U - Subfrequência) do nominal, com seis níveis de ajuste de trip e acumuladores de tempo para registrar o tempo de exposição a essas condições; (59 / 27) que é a proteção contra condições de tensão excessivamente alta (59 - Sobrevoltagem) ou baixa (27 - Subvoltagem) que podem danificar os isolamentos e outros componentes; (50/27) que é detecção de energização acidental do gerador enquanto ele está parado ou girando lentamente, o que pode causar grandes estresses e danos mecânicos (função combinada de subtensão e sobrecorrente); (27PT / 60FL) que é a identificação da perda do sinal de tensão de referência para o relé (27PT ou 60FL - Falha de Válvula de Potencial); (25) que é uma função opcional que verifica as condições de sincronismo (tensão, frequência e ângulo de fase) entre o gerador e o barramento da rede antes de permitir a conexão, evitando danos por fechamento fora de fase; (78) que é a detecção da perda de sincronismo (78 - Fora de Sincronismo) entre o gerador e a rede elétrica, que pode levar a grandes oscilações de potência, torques mecânicos excessivos e danos (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2021).

O relé oferece a compatibilidade com SEL-2600 Series RTD Module que possibilita o monitoramento de temperatura (49 - Térmico / 38 - Medição de Temperatura) através de RTDs (Resistance Temperature Detectors) para proteção térmica contra superaquecimento de enrolamentos e mancais (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2021).

Em suma, a aplicação de relés de proteção modernos, como o SEL-300G, é uma prática indispensável na operação de turbogeradores, fornecendo a inteligência e a capacidade de resposta necessárias para manter a segurança operacional e a integridade dos ativos de geração de energia, suportadas por funcionalidades técnicas robustas e padronizadas pela numeração ANSI. Na Figura 5.10, ilustra-se o relé SEL 300G.

Figura 71 – SEL 300G.



Fonte: (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2021).

5.7 REGULADOR DE VELOCIDADE 505 - WOODWARD

O Woodward 505 Digital Governor é um controlador eletrônico microprocessado de alto desempenho, projetado para a regulação e proteção de turbinas a vapor. Sua função principal é implementar um controle em malha fechada da velocidade de rotação da turbina, possibilitando alguns modos de controle, como o *Isochronous* e este atua para manter uma velocidade/frequência constante quando operando isoladamente. Tem-se o modo *Droop* (Regulagem) que permite o compartilhamento de carga com outras unidades geradoras, ajustando a velocidade de referência em função da carga. Contem o modo de controle de carga para ajuste da potência ativa (MW), frequentemente via setpoint de carga de supervisor e por fim, o controle de pressão de extração/contrapressão que gerencia a operação da turbina com base em pressões de processo (WOODWARD GOVERNOR COMPANY, 1997).

A unidade processa sinais de entrada de alta resolução provenientes de transdutores de velocidade (e.g., magnetic pick-ups), pressão, e temperatura, convertendo-os digitalmente para execução de algoritmos de controle avançados, tipicamente PID (Proporcional-Integral-Derivativo), que otimizam a resposta transiente e a estabilidade em regime permanente. A saída de controle é gerada como um sinal modulado (4-20 mA ou pulso modulado em largura - PWM) para interfaces com atuadores eletro-hidráulicos ou elétricos, permitindo um posicionamento preciso das válvulas de vapor (controle da válvula de fecho rápido, válvulas de controle de extração, etc.). Sua compatibilidade com atuadores de faixa única ou dividida (*single or split-range*) oferece flexibilidade na integração com a topologia mecânica da turbina (WOODWARD GOVERNOR COMPANY, 1997).

Seus recursos técnicos incluem também múltiplas camadas de proteção por software, incluindo trip por sobrevelocidade (baseado em lógica de comparação de *setpoints*),

monitoramento de limites operacionais (pressão, temperatura) e lógicas de segurança para evitar operações fora de envelope. Contém o diagnóstico *On-Board* que é a capacidade de autodiagnóstico, com registro de alarmes e eventos (*event logging*) e dados de tendência (*trend data*), facilitando a identificação de anomalias. Sua interface de comunicação é geralmente via portas seriais (ex: RS-232, RS-485) para parametrização, calibração e supervisão remota, permitindo integração com Sistemas de Controle Distribuído (DCS) ou SCADA. Na Figura 72, ilustra-se a o regulador de velocidade (WOODWARD GOVERNOR COMPANY, 1997).

Figura 72 – 505.



Fonte: (WOODWARD GOVERNOR COMPANY, 1997).

5.8 CPC-II – WOODWARD

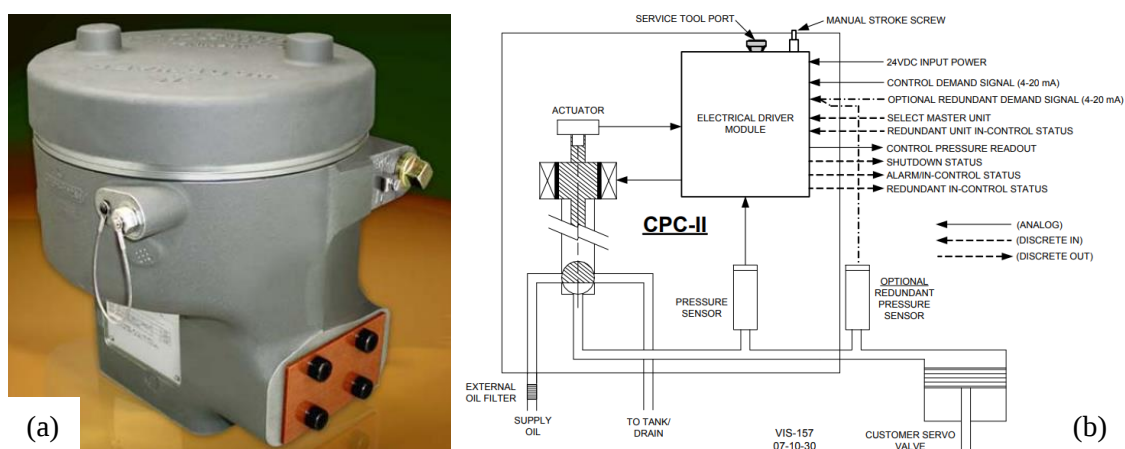
O Woodward CPC-II (Conversor de Corrente para Pressão, Geração II) é um controlador de pressão eletro-hidráulico projetado especificamente para uso em servos de válvula de ação simples em turbinas a vapor e hidráulicas. Ele atua como uma interface crítica, traduzindo um sinal de comando elétrico, que tipicamente é de 4-20 mA DC, proveniente de um governador digital como o Woodward 505 ou um sistema de controle distribuído – DCS, em uma pressão hidráulica de óleo precisa para o posicionamento de válvulas (WOODWARD, 2008).

Os principais componentes internos e sua interoperação são o módulo driver elétrico (*Electrical Driver Module*) e este é o "cérebro" eletrônico do CPC-II, pois recebe a alimentação elétrica (24 Vcc) e o sinal de comando principal de 4-20 mA (e opcionalmente

um sinal redundante). Contém os circuitos de processamento que interpretam o sinal de demanda e geram os sinais de controle apropriados para a seção hidráulica. Ele também gerencia as lógicas de redundância de entrada (votando entre sinais de comando) e as saídas de status discretas, atuando como a interface de comunicação para diagnóstico e configuração. Há uma válvula rotativa de movimento único e este é o principal elemento de controle hidráulico dentro do CPC-II, pois recebe o comando do módulo driver elétrico e a partir disso, sua função é modular o fluxo de óleo de suprimento para o servo da válvula do cliente e/ou para o dreno (retorno ao tanque), regulando a pressão de saída. O design de "movimento único" e a característica de "autolimpeza da entrada e da saída de óleo" são cruciais para a confiabilidade, minimizando o risco de travamento ou degradação de desempenho devido à contaminação do óleo. Tem-se o sensor de pressão (*Pressure Sensor* que está localizado internamente, este sensor monitora continuamente a pressão de óleo de saída gerada pela válvula rotativa. Ele fornece um sinal de *feedback* (analógico) ao módulo driver elétrico, criando uma malha de controle fechada interna ao CPC-II, permitindo que o módulo driver ajuste a válvula rotativa dinamicamente para garantir que a pressão de saída corresponda exatamente ao sinal de demanda de 4-20 mA, compensando variações na carga ou no suprimento de óleo. Pode haver um sensor de pressão redundante opcional para maior confiabilidade, com o módulo driver realizando a votação entre os sinais (WOODWARD, 2008).

Observando as conexões hidráulicas internas, a entrada de óleo de suprimento é um canal interno por onde o óleo hidráulico pressurizado é fornecido ao CPC-II. E a saída para Tanque/Dreno é outro canal interno para o retorno do óleo não utilizado ou de controle para o reservatório. Por fim, há a saída para o servo da válvula do cliente sendo o canal que direciona a pressão de óleo controlada para o atuador da válvula da turbina. Há um atuador que embora não seja um componente único com esse rótulo explícito no diagrama do seu manual, o "atuador forte" mencionado no manual refere-se à capacidade interna do CPC-II de gerar a força necessária para modular a válvula rotativa e, conseqüentemente, a pressão de saída. Isso é impulsionado pelo módulo driver elétrico interagindo com elementos eletromecânicos que controlam a válvula rotativa. Na Figura 73, ilustra-se o CPC e seu diagrama interno (WOODWARD, 2008).

Figura 73 – CPC (a) e seu esquemático (b).



Fonte: (WOODWARD, 2008).

5.9 DSLC (DIGITAL SYNCHRONIZER AND LOAD CONTROL)

Woodward DSLC (Digital Synchronizer and Load Control) é um controlador eletrônico microprocessado e multifuncional, projetado para o controle e proteção de geradores acionados por turbinas (ou motores), especificamente em contextos de operação em paralelo. Seu objetivo é viabilizar a operação paralela de um turbogerador com uma concessionária elétrica ou com outros geradores, seja em um barramento isolado ou conectado à rede. Ele integra as funções cruciais de sincronização automática e controle de carga, garantindo uma conexão segura, estável e otimizada do gerador ao sistema elétrico (WOODWARD, 2007).

O DSLC visa controlar de forma precisa a tensão, fator de potência, potência reativa, potência real e frequência do turbogerador, além de fornecer funcionalidades de proteção essenciais. O DSLC opera por meio de algoritmos avançados de controle digital, processando medições elétricas e gerando comandos para o sistema de controle do turbogerador (governador e regulador de tensão) e com isto, ele contém um sistema de sincronização automática inteligente que continuamente mede a tensão, frequência e ângulo de fase tanto do turbogerador quanto do barramento ao qual ele será conectado. Sua lógica de sincronização implementa um processo de casamento de frequência (geralmente via uma rampa de frequência aplicada ao governador da turbina), casamento de tensão e alinhamento de ângulo de fase para minimizar o choque elétrico no momento da conexão do disjuntor. Possui detecção de "barramento morto" e "gerador morto", adaptando automaticamente o

procedimento de sincronização. Ele gerência os comandos de fechamento e abertura de disjuntor e integra-se a entradas permissivas para garantir que a operação de sincronização ocorra somente sob condições seguras predefinidas. Com relação ao seu controle de carga e potência, ele permite controlar a potência ativa (MW) que o turbogerador fornece à rede, com modos como controle de carga base (*Base Load*) e controle de importação/exportação (*Import/Export Control*). Para o controle de potência reativa e fator de potência, ele monitora e ajusta a potência reativa (MVAR) e o fator de potência do turbogerador, interagindo com o regulador de tensão do gerador para otimizar a tensão do barramento e a qualidade da energia. Seu controle no compartilhamento de carga fornece configurações para múltiplos geradores em paralelo, e desta forma, o DSLC pode implementar lógicas para um compartilhamento proporcional e equitativo da carga entre as unidades (WOODWARD, 2007).

Outra característica é que ele facilita a entrada e saída de carga do turbogerador por meio de rampas de carregamento/descarregamento suaves, minimizando os estresses térmicos e mecânicos e prolongando a vida útil dos componentes da turbina. Há nelo o controle de tensão e fator de Potência e para isto ele opera como um regulador automático de tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*), ou trabalha em conjunto com um AVR externo, para manter a tensão do gerador dentro dos limites desejados através do controle da excitação do campo (WOODWARD, 2007).

Mesmo que o DSLC seja um controle, ele inclui funções de proteção para complementar o sistema de proteção principal como o de potência reversa que detecta quando o turbogerador está sendo acionado pela rede, operando como motor. Proteção de Sobre/Sub-excitação e para isto ele monitora e protege contra condições de excitação excessiva ou insuficiente. Identifica perda de tensão de sensoramento com o diagnostico de falhas nos circuitos de medição de tensão essenciais para o controle. Pode atuar também em falha de Sobre/Subfrequência e Sobre/Subtensão (WOODWARD, 2007).

O DSLC se integra ao sistema de potência através de medições precisas via transformadores de corrente (CTs) e transformadores de potencial (PTs). E oferece diversas entradas e saídas analógicas e digitais para comunicação com o governador da turbina, o regulador de tensão, o disjuntor e outros sistemas de controle e supervisão. Na Figura 74, ilustra-se o DSLC (WOODWARD, 2007).

Figura 74 – DSLC.



Fonte: (WOODWARD, 2007).

5.10 MSLC (DIGITAL SYNCHRONIZER AND LOAD CONTROL)

MSLC (“*Master Synchronizer and Load Control*”) é um controlador eletrônico de alta capacidade, projetado para orquestrar o controle e a sincronização de múltiplos geradores operando em paralelo, ou para gerenciar um único gerador de forma abrangente. O objetivo do MSLC é atuar como um controlador mestre e sincronizador para sistemas de geração. Ele permite o controle coordenado de um único gerador ou de múltiplos geradores (até 32 unidades), como turbogeradores, operando em paralelo com a concessionária de energia ou entre si. A relação com o DSLC (“*Digital Synchronizer and Load Control*”) reside na hierarquia de controle. Enquanto o DSLC é uma unidade de controle digital robusta para um gerador individual, o MSLC eleva o nível de controle para o sistema de geração completo. E ele pode funcionar de forma autônoma para controlar um único gerador, mas sua principal força reside na sua capacidade de supervisionar e coordenar a operação de uma rede de controladores Woodward, como múltiplos DSLCs ou outros controladores de gerador/turbina, via uma rede de comunicação. Isto permite ao MSLC, gerenciar a linha de interligação da planta com a concessionária, controlando o fluxo de potência ativa e reativa da planta como um todo. Também fornece um controle primário de frequência e potência real para a concessionária em operação conectada à rede (WOODWARD, 1993).

O MSLC opera com base em algoritmos de controle digital complexos, utilizando medições precisas para gerenciar o desempenho da(s) turbina(s) e gerador(es) e contém o controle chamado de sincronização mestra que fornece sincronização automática para um ou mais geradores. Embora as unidades individuais (como DSLCs) realizem a sincronização

local, o MSLC pode coordenar este processo em nível de planta, garantindo que múltiplos geradores sejam sincronizados sequencialmente ou em paralelo, conforme a estratégia de operação (WOODWARD, 1993).

Para o controle integrado de carga e frequência, o MSLC implementa modos de controle de carga, frequência, tensão e potência reativa tanto para a planta como um todo quanto para geradores individuais e ele gerencia a potência ativa total (MW), a frequência, crucial para a estabilidade da rede e regula o fluxo de potência ativa entre a planta e a rede externa (WOODWARD, 1993).

Outra função é que ele permite ajustar a saída do gerador com base em um sinal de processo externo, assim em operação em ilha, ele fornece controle de carga/frequência quando a planta está isolada da concessionária. E quando estão sincronizadas com a concessionária, ele ajusta o compartilhamento de carga, ou seja, distribui a carga de forma equitativa ou proporcional entre os geradores conectados na rede. Ele também atua no controle de tensão, VAR e fator de potência, pois coordena a tensão do barramento e os fluxos de potência reativa (MVAR) e fator de potência de múltiplos geradores, atuando sobre os reguladores de tensão individuais (WOODWARD, 1993).

Em síntese, o MSLC expande as funcionalidades do DSLC, agindo como o controlador hierárquico que coordena a sincronização, o carregamento e o desempenho elétrico de um grupo de turbogeradores, ou de um único turbogerador, em relação a uma rede externa ou a um barramento isolado, garantindo a integração eficiente e segura da planta de geração. Na Figura 75, ilustra-se o MSLC (WOODWARD, 1993).

Figura 75 – MSLC.



Fonte: (WOODWARD, 1993).

5.11 UNITROL F SERIES – ABB (AVR)

O AVR (*Automatic Voltage Regulator*), na sua implementação pela série UNITROL F da ABB, é um sistema de excitação digital projetado com objetivo de, em um turbogerador, realizar o controle contínuo da tensão terminal do gerador, tendo como elemento-chave, o sistema de excitação, e ele garante o desempenho e a estabilidade ótimos da máquina síncrona. Em um contexto de turbogeradores de grande porte, o AVR visa influenciar o limite de estabilidade e a estabilidade de tensão do gerador em operação e controlar o comportamento dinâmico promovendo o amortecimento de oscilações de potência, assegurando a qualidade da tensão na rede (ABB, 2022).

O UNITROL F opera como um sistema de controle em malha fechada de alta velocidade, ajustando a corrente de campo do turbogerador para manter os parâmetros elétricos desejados. Ele tem uma arquitetura que consiste em um sistema de excitação tipicamente configurado para excitação indireta, onde ele controla o campo de uma máquina excitadora (que pode ser rotativa ou estática), e esta, por sua vez, alimenta o campo do gerador principal. A fonte de energia para o sistema de excitação é um "*shunt supply*", onde a potência é extraída diretamente dos terminais do próprio turbogerador via transformadores de potência (VTs). Um retificador de tiristores, controlado pelo AVR, é o componente principal que converte a tensão CA proveniente do suprimento *shunt* em uma tensão CC variável e controlada aplicada ao campo da máquina excitadora. Durante a partida do turbogerador, um circuito de excitação inicial é geralmente necessário para construir o campo inicial do gerador antes que sua própria tensão terminal seja suficiente para alimentar o AVR (ABB, 2022).

O AVR mede continuamente a tensão terminal do turbogerador, bem como sua corrente de campo, tensão de campo, e potência reativa/fator de potência. Essas medições são comparadas aos setpoints de referência, e o erro resultante é processado por algoritmos de controle que geram um sinal de disparo para os tiristores do retificador, ajustando a saída de CC para o campo do excitador e, assim, a tensão e a potência reativa do gerador. Para garantir a estabilidade e a qualidade de energia, o sistema de controle incorpora limitadores de operação, como o limitador de sobre-excitação (OEL - *Overexcitation Limiter*) que protege o enrolamento de campo contra superaquecimento. Também há o limitador de sub-excitação (UEL - *Underexcitation Limiter*) que previne a perda de sincronismo e a operação em regiões de instabilidade. Para o limitador de corrente do estator, ele protege o estator contra sobrecargas enquanto o limitador de corrente de campo e tensão de campo, mantém os parâmetros de campo dentro dos limites seguros (ABB, 2022).

O UNITROL® F oferece configurações como "*Dual Auto. Channel*", que consistem em dois canais de controle idênticos e independentes operando em paralelo e esta configuração permite uma transferência transparente do canal ativo para o *standby* em caso de falha do canal primário, e desta forma, não há interrupção na excitação do gerador. Este recurso aumenta dramaticamente a confiabilidade e a disponibilidade do sistema, fundamental para a operação ininterrupta de grandes turbogeradores (ABB, 2022).

Além dos limitadores, o AVR inclui diversas proteções lógicas e baseadas em circuito, como a proteção de sobrecorrente de excitação/campo, o monitoramento da integridade dos sinais de tensão, a proteção de sobre/subtensão na frequência de potência, a proteção de perda de excitação e a detecção instantânea de curto-circuito de campo (ABB, 2022). Na Figura 76, ilustra-se um exemplo deste dispositivo.

Figura 76 – UNITROL F ABB.



Fonte: (ABB, 2022).

5.12 QUALIDADE DO VAPOR E DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

As incrustações nas turbinas provocadas por vapor contaminado podem levar a perturbações termodinâmicas e mecânicas, como, por exemplo, quebra de palhetas. O custo do tratamento da água é relativamente baixo comparado com os danos provocados pelas incrustações decorrentes da presença de impurezas. Os índices exibidos na Tabela 1, indicam os teores máximos para o vapor superaquecido de na admissão da turbina. Além do acompanhamento da qualidade do vapor, a aplicação do procedimento de sopragem de linha é importante para remover o máximo de impurezas nas tubulações, após longos períodos de parada de planta, no caso do setor sucroenergético, a entressafra. Na Figura 77, ilustra-se este procedimento.

Tabela 1 – Características do vapor superaquecido.

VALORES DE REFERÊNCIA PARA CONDENSADO DO VAPOR VIVO			
Pressão de vapor	Até 32 bar	De 33 a 52 bar	Acima de 53 bar
Condutividade a 25 °C para água isenta de CO ₂	< 0,5 uS/cm		< 0,3 uS/cm
Óxido de silício (SiO ₂)	< 50	< 25	< 10
Ferro (Fe)	< 30	< 15	< 5
Demais metais pesados	< 20	< 10	< 2
Sódio (Na) + Potássio (K)	< 20	< 10	< 2
Alcalinidade total	< 100	< 60	< 50
Dureza	0		

Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

Figura 77 – Sopragem de linha.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em condensadores e trocadores de calor, a seleção de seus materiais de sua constituição, está relacionada com o tipo da água de refrigeração. Torna-se evidente que a agressividade da água em operação contínua não deve aumentar em relação ao valor originalmente especificado, pois se pode reduzir significativamente a vida média dos equipamentos. Além disso, o acúmulo de depósitos nos tubos reduz sensivelmente a eficiência

de troca de calor e propicia uma aceleração da corrosão interna. Na Tabela 2, ilustra-se os requisitos mínimos para a água de resfriamento.

Tabela 2 – Características da água de resfriamento.

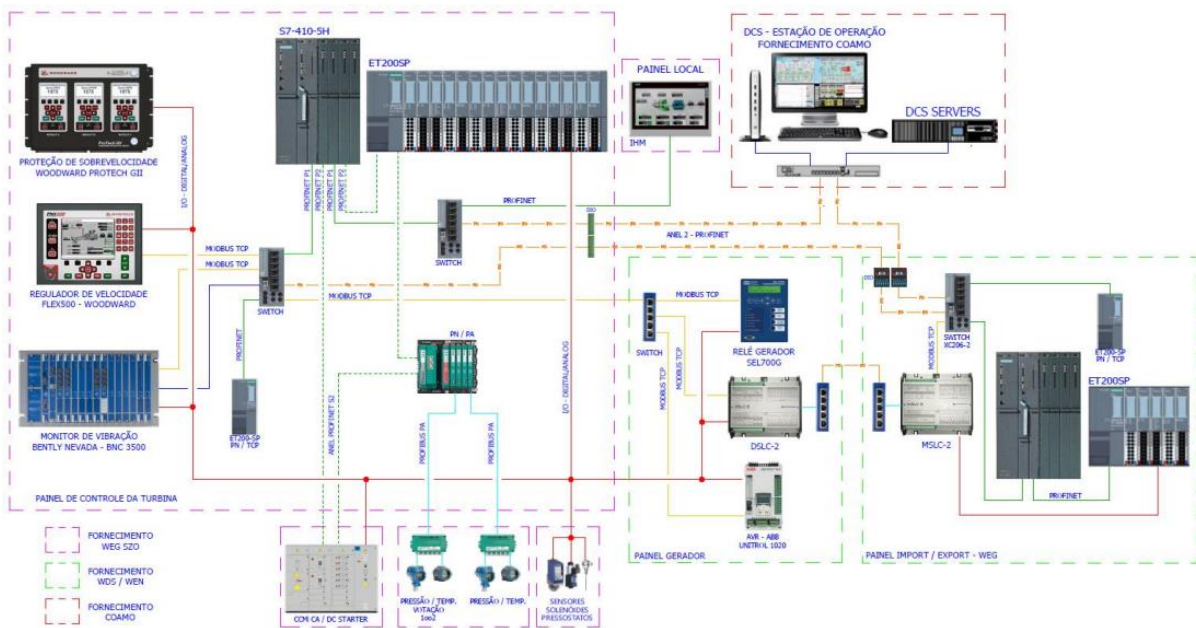
Grandeza	Medida
pH	7
Acido carbônico	3 g/l
Dureza do carbonato	6° dH
Dureza do carbonato para fosfatos polimorfos	12° dH
Dureza de não carbonato	80° dH
Cloretos	400 mg/l
Sulfatos	500 mg/l
Teor total de sal	3000 mg/l
Alcalinidade total	15 mmol/l
Ácido silícico	200 mg/l
Partículas em suspensão	10 mg/l

Fonte: (TGM TURBINAS, 2008).

5.13 DIAGRAMA DO CONTROLE DE UM TURGOGERADOR (EXEMPLO)

Considerando os componentes de controle e proteção descritos, observa-se que mesmo eles sendo de diferentes empresas, o protocolo de comunicação deve ser padronizado para implementação de projetos e desta forma, na Figura 78, ilustra-se um esquema de comunicação de um turbogerador, a fim de consolidar o entendimento de cada componente e como estes se interligam a fim de garantir um controle confiável e proteção efetiva (WEG - TGM, 2024).

Figura 78 – Exemplo de interligação entre componentes.



Fonte: (WEG - TGM, 2024).

6 ANÁLISE DE FALHA NA ATVOS BIOENERGIA CONQUISTA DO PONTAL

Considerando a oportunidade de trabalho na ATVOS Bioenergia Conquista do Pontal, na área de engenharia de confiabilidade, foi possível ter acesso a uma metodologia empregada internamente para a realização de análises de falha das paradas e este procedimento consiste em classificar as anomalias, podendo ser falhas potencias ou funcionais que influenciam no rendimento do setor ou que trazem alguma parada de produção. Assim, foi implementado o relatório preliminar de anomalia (RPA) que serve como um procedimento descritivo do problema ocorrido e a partir dele, é possível classificar em 5 critérios, sendo estes o de redução de produção, percentual de parada do setor envolvido no problema, quantidade de falhas semelhantes ocorridas, custo de manutenção e se gera risco na segurança pessoal e material.

Com a descrição completa, é possível avaliar a necessidade da construção da análise de falha, e esta é composta por 4 etapas, sendo a construção de um diagrama de *Ishikawa* ou chamado de espinha de peixe e ele é dividido em 6 tópicos, sendo eles o de máquinas, método, mão de obra, material, meio ambiente e medições e todas as informações colocadas são referentes ao defeito ocorrido. Na segunda etapa, baseado no diagrama realizado anteriormente, constrói-se uma matriz de priorização, e ela é composta por itens do diagrama que tiveram um grau de influência considerado grande na causa do problema e cada um deles vai sendo classificado conforme a gravidade, tendência e urgência. Em seguida, após a priorização, o item com mais impacto na causa do problema, é direcionado para a técnica dos 5 porquês que vai destrinchar as causas, até que seja encontrado a causa raiz do problema e diante disto, montar um plano de ação para mitigar e evitar que ocorra novamente.

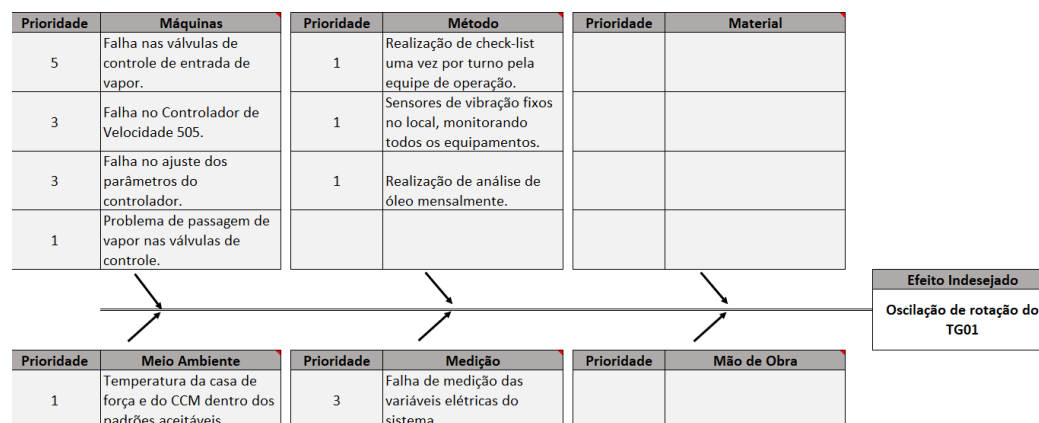
6.1 PROBLEMA DE OSCILAÇÃO DE ROTAÇÃO DO TURBOGERADOR 01

Para ter a compreensão do problema, o descritivo do problema colocado no relatório preliminar de anomalia consta que houve uma falha de sincronismo do gerador ocorrendo no dia 15/08/2023 e neste dia na unidade a moagem parada por solo úmido e ocorreu o desarme do disjuntor após o secundário do transformador que alimenta a planta, e ao verificar o ocorrido a equipe de operação da casa de força identificou oscilação de frequência da concessionária, causada pela abertura da interligação do sistema integrado nacional em três partes, e evento que ocorreu pelo distúrbio na linha de transmissão 500 kV Quixadá-Fortaleza II e pela atuação incorreta no sistema de proteção da linha, que operava dentro dos limites.

Após o desarme, equipe de operação da casa de força tentou novamente sincronizar a máquina, porém sem sucesso devido à instabilidade na rotação da Turbina 01.

Assim com as causas do problema, foi construído o diagrama de espinha de peixe, e ilustrado na Figura 79.

Figura 79 – Diagrama de espinha de peixe desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a definição destes parâmetros, na Figura 80, ilustra-se a priorização realizado com os itens de prioridade 5 e 3.

Figura 80 – Matriz de priorização.

Problema		G	U	T	Total	Priorização
1	Falha nas válvulas de controle de entrada de vapor.	5	5	5	125	1
2	Falha no Controlador de Velocidade 505.	5	4	4	80	3
3	Falha no ajuste dos parâmetros do controlador.	4	4	4	64	4
4	Falha de medição das variáveis elétricas do sistema.	5	5	4	100	2

Pontos	"G" (Gravidade)	"U" (Urgência)	"T" (Tendência)
5	Prejuízos ou Dificuldades Extremamente Graves	Necessária uma Ação Imediata	Se nada for Feito, o Agravamento será Imediato
4	Muito Graves	Com Alguma Urgência	Vai Piorar a Curto Prazo
3	Graves	O mais Cedo Possível	Vai Piorar a Médio Prazo
2	Pouco Graves	Pode Esperar um pouco	Vai Piorar a Longo Prazo
1	Sem Gravidade	Não tem Pressa	Não vai Piorar ou Pode até Melhorar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a priorização, e desenvolvendo a técnica dos porquês, observou que a causa raiz do problema foi a falha no ajuste das válvulas de regulagem, especificamente no início de abertura delas, e desta forma, foi trazido uma empresa terceira para realizar a verificação dos parâmetros do CPC e observar mecanicamente as válvulas de regulagem e com a visita técnica, observou que os ganhos do controlador PID do CPC atende as especificações de fabricação, porém mecanicamente, o ajuste das mola do êmbolo da válvula de regulagem fazia com que a segunda válvula abrisse de forma antecipada, fazendo com que haja uma entrada de vapor a mais e causava a oscilação de rotação do turbogerador e com este vapor a

mais, o controle dava sinal para fechar as válvulas a fim de atingir o *setpoint* e por conta deste problema, o sistema ficava oscilando, abrindo e fechando as válvulas 1 e 2. Na Figura 81, ilustra-se os valores encontrados para abertura das válvulas de regulagem.

Figura 81 – Abertura das válvulas de regulagem.

TG1				Faixa "P3" - (kgf/cm ²)					
Nominal	Servo Motores	Pré-tensão Mola (mm)		2	3,31	4	4,44	6,49	
	RD200G/V1	40,4	Curso (mm)	início	22,0	-	-	-	
	RD200G/V2	60,4	Curso (mm)	-	início	17	-	-	
	RD160G/V3	80,4	Curso (mm)	-	-	início	8,5	-	
	RD160G/V4	89,4	Curso (mm)	-	-	-	início	40,0	

TG1				Faixa "P3" - (kgf/cm ²)					
Real	Servo Motores	Pré-tensão Mola (mm)		1,60	1,95	2,78	3,96	4,31	6,5
			Corrente Atuador (mA)	4,00	5,12	7,84	11,68	12,80	20,00
	RD200G/V1	40,4	Curso (mm)	0	início	20	-	-	40
	RD200G/V2	60,4	Curso (mm)	0	-	início	18	-	40
	RD160G/V3	80,4	Curso (mm)	0	-	-	início	8,0	40
	RD160G/V4	89,4	Curso (mm)	0	-	-	-	início	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante disto, a manutenção e verificação foi realizada e a falha foi sanada e isto mostra como é importante a aplicação de análises de falha para encontrar a causa raiz do problema e isto auxilia no entendimento da falha e construção de um plano para que a ela não ocorra novamente.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cogeração em usinas sucroenergéticas no Brasil oferece benefícios econômicos e de sustentabilidade significativos como a autossuficiência energética, redução de custos de produção, diversificação de produtos e receitas e a redução significativa das emissões de CO₂, atendimento a metas de redução de emissões de gases de efeito estufa.

A história da cogeração demonstra que, embora tecnicamente superior, sua adoção em larga escala é fortemente influenciada por fatores econômicos e regulatórios, sublinhando a necessidade de políticas de incentivo e um ambiente de mercado favorável. A flexibilidade de combustível e a elevada eficiência da cogeração a posicionam como um pilar fundamental para a transição energética global e a descarbonização industrial, especialmente quando integrada com fontes renováveis como a biomassa.

No contexto das usinas sucroenergéticas, a cogeração a partir do bagaço de cana-de-açúcar aplicados em diferentes ciclos termodinâmicos e configurações de turbinas como a contrapressão e extração-condensação mostram que para o atendimento de condições sustentáveis expostas pelo mercado mundial, necessita que um grande arranjo de estudos mecânicos, elétricos e de instrumentação a fim de garantir a segurança e eficiência das operações com turbogeradores, pois com o mapeamento das possíveis falhas, a aplicação de técnicas de manutenção e de resolução de falha é essencial para a evolução da cadeia de manutenção, partindo para o passo de antecipação de falha, elevando a confiabilidade do ativo e garantindo que a disponibilidade da planta.

O estudo dos princípios de funcionamento do sistema de um turbogerador auxilia na construção da análise de falha, pois observando que há questões mecânicas, elétricas, instrumentação e de operacionalidade que influenciam no desempenho do turbogerador e falha em qualquer um destes itens, podem ser rastreados e com a proteção do turbogerador, elas podem ser mitigadas, porém nem todas as falhas podem estar inclusas na faixa de proteção definida em projeto, e desta maneira a aplicação de técnicas de confiabilidade como análise de falha, pode servir para compreender uma falha ocorrida e antecipar o problema. Uma das estratégias implementadas pela ATVOS Bioenergia foi a implementação do check-list com termografia e a aplicação de sensores de vibração e temperatura da TRACTIAN que atuam na coleta de dados e como é um monitoramento a cada 10 min, é possível construir um histórico e com ela, há uma inteligência artificial que analisa os espectros e informa avisos de anomalias e de princípios de falhas. Assim, aplicando novas maneiras de identificar falhas, auxilia na garantia de uma alta disponibilidade e eficiência na operação do turbogerador.

REFERÊNCIAS

ABB. Excitation System UNITROL® F Series. São Paulo, 2022.

AGENCIA FAPESP. Proálcool: uma das maiores realizações do Brasil baseadas em ciência e tecnologia. 2016. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/proalcool-uma-das-maiores-realizacoes-do-brasil-baseadas-em-ciencia-e-tecnologia/24432>. Acesso em: 24 jan. 2025.

BENEDICT, Linda F.. Sugarcane History. 2005. Disponível em: <https://www.lsuagcenter.com/portals/communications/publications/agmag/archive/2002/fall/sugarcane-history>. Acesso em: 14 jan. 2025.

BRASIL alcança a maior produção de etanol da história. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2020/04/brasil-alcanca-a-maior-producao-de-etanol-da-historia>. Acesso em: 30 jan. 2025.

BRASIL fecha safra 2023/24 de cana com recorde de 700 milhões de toneladas Leia mais em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2024/04/brasil-fecha-safra-2023-24-de-cana-com-recorde-de-700-milhoes-de-toneladas/>. 2024. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2024/04/brasil-fecha-safra-2023-24-de-cana-com-recorde-de-700-milhoes-de-toneladas/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

CANA-DE-AÇUCAR e Ilha da Madeira. 2020. Disponível em: <https://blog.madeira.best/sugar-cane-and-madeira-island>. Acesso em: 18 jan. 2025.

CURSO operador de moenda. 1999. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/486432358/Curso-operacao-de-moendas>. Acesso em: 03 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. RenovaBio. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio#:~:text=O%20RenovaBio%20%C3%A9%20a%20Pol%C3%A9tica,sustentabilidade%20ambiental%2C%20econ%C3%B4mica%20e%20social..> Acesso em: 31 jan. 2025.

EXERGIA. Disponível em: https://sites.fem.unicamp.br/~franklin/EM460/pdf/exergia_parte1.pdf. Acesso em: 03 fev. 2025.

FIOMARI, Marcelo. Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão. Dissertação de mestrado apresentado à Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2004. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/nuplen/analise-energeticae-exergetica-de-uma-usina-sucroalcooleira-do-oeste-paulista-com-sistema-de-cogeracao-deenergia-em-expansao.pdf>

HERMSEN, Elizabeth J.. History of sugarcane. 2023. Disponível em: [https://evolution.earthathome.org/grasses/andropogoneae/sugarcane-history/#:~:text=Scientists%20think%20that%20sugarcane%20\(Saccharum,at%20least%203000%20years%20ago..](https://evolution.earthathome.org/grasses/andropogoneae/sugarcane-history/#:~:text=Scientists%20think%20that%20sugarcane%20(Saccharum,at%20least%203000%20years%20ago..) Acesso em: 16 jan. 2025.

HISTORY of Sugar. Disponível em: <https://www.sugar.org/sugar/history/>. Acesso em: 28 jan. 2025.

MOREIRA, José R. Simões. FUNDAMENTOS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS COGERAÇÃO E APLICAÇÕES. 2018. Disponível em: <https://paineira.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2018/10/PME5237-Cogeracao.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2025.

PANORAMA Setor Sucroenergético. 2023. Disponível em: <https://fpagropecuaria.org.br/2023/02/24/panorama-setor-sucroenergetico/#:~:text=O%20setor%20sucroenerg%C3%A9tico%20brasileiro%20abrange,para%20os%20processos%20produtivos%20citados>. Acesso em: 15 ago. 2024.

POTENCIALIZEE. Cogeração: entenda o processo que gera dois tipos de energia a partir de um combustível. 2023. Disponível em: <https://www.programa-potencializee.com.br/noticias/cogeracao-entenda-o-processo-que-gera-dois-tipos-de-energia-a-partir-de-um-combustivel-2/>. Acesso em: 01 fev. 2025.

PRÓALCOOL - Programa Brasileiro de Álcool. 2012. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol>. Acesso em: 30 jan. 2025.

RAMOS, Ricardo Alan Verdú; SILVA, João Batista Campos. MÁQUINAS HIDRÁULICAS E TÉRMICAS. Ilha Solteira: Unesp, 2009.

RHUM AGRICOLE. A Story About Sugarcane. Disponível em: <https://www.rhum-agricole.net/site/en/index.php?id=cane>. Acesso em: 20 jan. 2025.

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

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL-300G Data Sheet. Pullman, Wa, Eua, 2021.

SEBRAE. Processos industriais: o que são e qual sua importância? 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/processos-industriais-o-que-sao-e-qual-sua-importancia,7d7ed972abdb6810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SUGAR plantations in the Caribbean. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Sugar_plantations_in_the_Caribbean. Acesso em: 19 jan. 2025.

SUGARCANE. Disponível em: <https://www.cirad.fr/en/our-activities-our-impact/tropical-value-chains/sugarcane/plant-and-uses>. Acesso em: 15 jan. 2025.

TGM TURBINAS. TM 35000 A: manual de instruções. Sertãozinho, 2008.

UMANS, Stephen. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708 p.

WEG - TGM. PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO PROFISSIONAL. Sertãozinho: Weg - Tgm, 2024. Color.

WOODWARD. CPC-II Current-to-Pressure Converter. Fort Collins, 2008.

WOODWARD. DSLC Digital Synchronizer and Load Control: installation and operation manual. Fort Collins, 2007.

WOODWARD GOVERNOR COMPANY. 505 DIGITAL GOVERNORS FOR STEAM TURBINES WITH SINGLE OR SPLIT-RANGE ACTUATORS. Fort Collins, 1997.

WOODWARD. MSLC Master Synchronizer and Load Control: installation and operation manual. Fort Collins, 1993.

ZANICHELLI, Alan Spósito. Estimativa do Potencial de Acréscimo da Oferta de Energia no Setor Sucroalcooleiro Paulista a Partir de Cogeração e Gaseificação do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Utilização de Ciclo Combinado. 2015. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139128/000865316.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 fev. 2025.