

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA MUCCI

**MANUTENÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DESMINERALIZADA DE PROJETO
PARA REPOSIÇÃO DE ÁGUA DA CALDEIRA**

LONDRINA

2023

CAROLINA MUCCI

**MANUTENÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DESMINERALIZADA DE PROJETO
PARA REPOSIÇÃO DE ÁGUA DA CALDEIRA**

**MAINTENANCE OF PROJECT DEMINERALIZED WATER PRODUCTION FOR
BOILER WATER REPLACEMENT**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Admilson Lopes Vieira
Coorientador(a): Lisandra Ferreira de Lima

LONDRINA

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CAROLINA MUCCI

**MANUTENÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DESMINERALIZADA DE PROJETO
PARA REPOSIÇÃO DE ÁGUA DA CALDEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14 de dezembro de 2023

Admilson Lopes Vieira

Doutorado em Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus
Londrina

Sidmara Bedin

Doutorado em Engenharia Química Universidade Estadual de Campinas - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná – Campus Londrina

Guilherme Araújo Moraes Bernardino de Souza

Graduação Engenheiro Químico – Universidade São Paulo
MBA – Gestão de Projetos e Processos pelo IPOG

LONDRINA

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, devo meu agradecimento à Deus, que pela Sua vontade e cuidado permitiu que eu chegasse até este momento, todo o meu louvor às oportunidades e desafios ao longo do caminho e honra a tudo o que até hoje tenho conquistado.

Em segundo lugar, aos meus pais que sempre foram a minha base, me apoiando nas decisões, aconselhando e investindo emocional e financeiramente para que hoje eu pudesse ter a oportunidade de estar aqui concluindo a minha graduação. Agradeço também, aos meus irmãos que sempre fizeram parte dessa jornada e nunca saíram do meu lado.

Aos meus amigos que adquiri nessa caminhada, que fizeram com que todo o processo tenha sido mais leve e divertido. Um agradecimento especial a todos os professores que passaram nestes cinco anos de graduação, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Admilson Lopes Vieira e Prof. Dra. Larissa Maria Fernandes.

Agradeço por fim, à minha Supervisora Viviane Nunes Griep que desde o início do meu estágio e trabalho na Raízen, não mediu esforços com a sua colaboração e ensinamentos. Principalmente por ter me dado total confiança e oportunidade para que eu tivesse sucesso na minha carreira profissional e vida pessoal.

Para finalizar, me sinto hoje uma mulher realizada, feliz e satisfeita pela finalização de mais um ciclo, para início de outro na minha vida. Com a certeza de que Deus colocou pessoas certas no meu caminho para que hoje eu pudesse realizar mais um sonho.

RESUMO

A água é uma substância fundamental para vários processos e no processo produtivo de uma usina sucroalcooleira não é diferente. Uma das suas principais utilizações é na caldeira para a geração de vapor, onde a água sofre mudança de estado líquido para vapor em altas ou baixas pressões, e este vapor gerado é responsável pelo acionamento das turbinas da moenda e gerador de energia. As caldeiras são compostas por tubulações onde ocorre a troca térmica com a água para a mudança de estado, sendo fundamental que estas recebam tratamento afim de diminuir os riscos de incrustações nas tubulações da planta de geração de vapor. Cada tipo de caldeira exige um tratamento de água; as caldeiras de alta pressão demandam água desmineralizada para sua alimentação; as caldeiras de baixa pressão, por sua vez, demandam água filtrada/abrandada. Diante do exposto, o presente trabalho foi responsável por identificar a causa raiz de uma parada da moagem em uma planta do setor sucroalcooleiro por falta de água desmineralizada para reposição de água das caldeiras de alta pressão. A metodologia utilizada foi o Ciclo PDCA como ferramenta da qualidade afim de obter mais precisão nas evidências e soluções. A média de água desmineralizada produzida na Safra 22'23 era de 45 m³/h por planta desmi. Na Unidade Gasa, onde foi desenvolvido o presente trabalho existem duas plantas de desmineralização de água, representando 75% da produção nominal de 60 m³/h. Identificou-se, portanto, a falta de gestão da qualidade do tratamento hídrico, e deficiência na gestão de manutenção como causas raiz. Ao aplicar as ações corretivas criação do procedimento e substituição do vaso catiônico, foi possível obter até novembro 2023 um aumento de 10 m³/h de produção, representando 91,60% da produção nominal.

Palavras-chave: produção de vapor; caldeiras; Ciclo PDCA; água desmineralizada.

ABSTRACT

Water is a fundamental substance for several processes and the production process of a sugar and alcohol plant is no different. One of its main uses is in the boiler to generate steam, where water undergoes a change from liquid to steam at high or low pressures, and this generated steam is responsible for driving the mill turbines and power generator. The boilers are made up of pipes where thermal exchange occurs with the water to change its state, and it is essential that these receive treatment in order to reduce the risk of scale in the pipes of the steam generation plant. Each type of boiler requires water treatment; high-pressure boilers require demineralized water for their supply; Low pressure boilers, in turn, require filtered/softened water. In view of the above, the present work was responsible for identifying the root cause of a grinding stoppage in a plant in the sugar and alcohol sector due to a lack of demineralized water to replace the water in the high-pressure boilers. The methodology used was the PDCA Cycle as a quality tool in order to obtain more precision in the evidence and solutions. The average demineralized water produced in Harvest 22'23 was 45 m³/h per demi plant. At the Gasa Unit, where this work was carried out, there are two water demineralization plants, representing 75% of the nominal production of 60 m³/h. Therefore, the lack of quality management of water treatment and deficiency in maintenance management were identified as root causes. By applying corrective actions, creating the procedure and replacing the cationic vessel, it was possible to obtain an increase of 10 m³/h in production by November 2023, representing 91.60% of nominal production.

Keywords: steam production; boilers; PDCA cycle; demineralized water.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de Desmineralização de Água – Unidade Gasa Linha 1.....	13
Figura 2 – Sistema de Desmineralização de Água – Unidade Gasa Linha 2.....	13
Figura 3 – Fluxograma do Sistema de Desmineralização.....	14
Figura 4 – Resumo processo produção de açúcar na Raízen.....	16
Figura 5 – Diagrama padrão de cogeração em usinas de açúcar e álcool.....	19
Figura 6 – Componentes principais da caldeira de vapor.....	21
Figura 7 – Caldeira flamotubular.....	22
Figura 8 – Caldeira aquatubular fixa vertical.....	23
Figura 9 – Incrustações causada por sais de cálcio e magnésio.....	26
Figura 10 – Ciclo PDCA.....	29
Figura 11 – Vazão média de água Desmi Safra 22'23 e Vazão Ideal Nominal.....	30
Figura 12 - Produção Água Desmineralizada de junho até outubro 2022.....	31
Figura 13 – Estudo do fluxograma Ponto de Geração e Percepção do Problema.....	31
Figura 14 – Implementação dos 5 “porquês”	32
Figuras 15 e 16 – Evidências Filtro de Carvão.....	33
Figuras 17 e 18 – Evidências Rompimento Filtro de Carvão.....	34
Figura 19 – Equipamento Jartest ou ensaio de floculação.....	35
Figura 20 – Identificação das Contramedidas.....	36
Figura 21 – Cronograma de implementação de contramedidas.....	37
Figura 22 – Gráfico Produção de água desmineralizada m³/h Safra 23'24.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação caldeiras de acordo com as pressões de operação...	20
Tabela 2 – Funções dos dispositivos de segurança de caldeira de vapor.....	21
Tabela 3 – Classificação das impurezas encontradas nas águas industriais....	24

LISTA DE SIGLAS

ETA – Estação de Tratamento de Água

ÁGUA DESMI – Água Desmineralizada

PDCA – Plan, Do, Check e Act

POP – Procedimento Operacional Padrão

ART – Açúcares Redutores Totais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Processo Produtivo.....	16
2.1.1	Tratamento de Caldo.....	17
2.1.2	Evaporação do Caldo.....	17
2.1.3	Cozimento e cristalização.....	17
2.1.4	Centrifugação do Açúcar.....	18
2.1.5	Secagem do produto.....	18
2.1.6	Fermentação.....	18
2.1.7	Centrifugação Vinho Levedurado.....	18
2.1.8	Destilação.....	19
2.2	Geração de Vapor.....	19
2.2.1	Tipos de Caldeiras.....	22
2.2	Água de Alimentação.....	23
2.3.1	Dureza.....	25
2.3.2	PH.....	26
2.3.3	Alcalinidade.....	26
2.4	Tratamento de água.....	26
2.4.1	Clarificação.....	26
2.4.2	Filtração.....	27
2.4.3	Abrandamento.....	27
2.4.4	Desmineralização.....	27
3	PESQUISA E ANÁLISE DAS HIPÓTESES.....	28
3.1	Metodologia de análise.....	28
3.1.1	Etapa 1: Esclarecimento do Problema.....	30
3.1.2	Etapa 2: Estratificação do Problema.....	30
3.1.3	Etapa 3: Estabelecendo a Meta.....	31
3.1.4	Etapa 4: Identificação Causa Raiz/Evidências.....	31
3.2	Material.....	32
3.3	Método.....	34
3.4	Máquina.....	35
3.5	Mão de Obra.....	35
4	SOLUÇÕES.....	35

4.1	Etapa 5: Identificação das Contramedidas.....	36
4.2	Etapa 6: Implementação das Contramedidas.....	37
4.3	Etapa 7: Monitoramento de Resultados.....	38
4.4	Etapa 8: Padronizar Processos.....	38
5	CONCLUSÃO.....	39
	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A Raízen Energia S.A é uma empresa integrada de energia de origem brasileira, referência global em bioenergia, protagonista em transição energética, com o intuito de cada dia mais redefinir o futuro da energia. Foi criada a partir da junção dos negócios da Shell e Cosan em 2011.

Raízen é uma palavra originada da junção de RAIZ e ENERGIA, pois a empresa está presente desde a plantação, produção e venda de energia renovável a partir da cana-de-açúcar.

A Raízen se destaca por ser a principal no setor sucroalcooleiro do país, ocupando o primeiro lugar em produção de etanol de caldo de cana-de-açúcar do Brasil, e maior exportadora de açúcar no mercado internacional. Sua produção conta com cerca de 3500 milhões de litros de etanol por safra, e além disso as 35 unidades de produção juntas produzem 6,2 milhões de toneladas de açúcar, além de possuírem 1,5 GW de capacidade para produção de energia elétrica a partir do bagaço.

O propósito da empresa é mobilizar pessoas e potencializar negócios pela energia que é entregue, comprometidos com a ética, segurança e sustentabilidade. A empresa é responsável pelo emprego de mais de 40 mil funcionários espalhados nas usinas, escritórios e postos de distribuição no Brasil e, recentemente, escritórios administrativos na Argentina.

Diante do exposto, o presente trabalho foi realizado na Usina Raízen Energia S.A, na cidade de Andradina, interior do Estado de São Paulo, Unidade Gasa, com o intuito de analisar o desempenho operacional em dois Sistemas de Desmineralização de Água. A partir de uma parada na moagem da usina Unidade Gasa por falta de água produzida pela Desmi nas caldeiras de alta pressão, planta de geração de vapor em junho de 2022, foi desenvolvido o estudo em questão. As Figuras 1 e 2 corresponde ao Sistema de Desmineralização de Água.

Figura 1 – Sistema de Desmineralização de Água – Unidade Gasa – Linha 1



Fonte: Aatoria Própria, 2022.

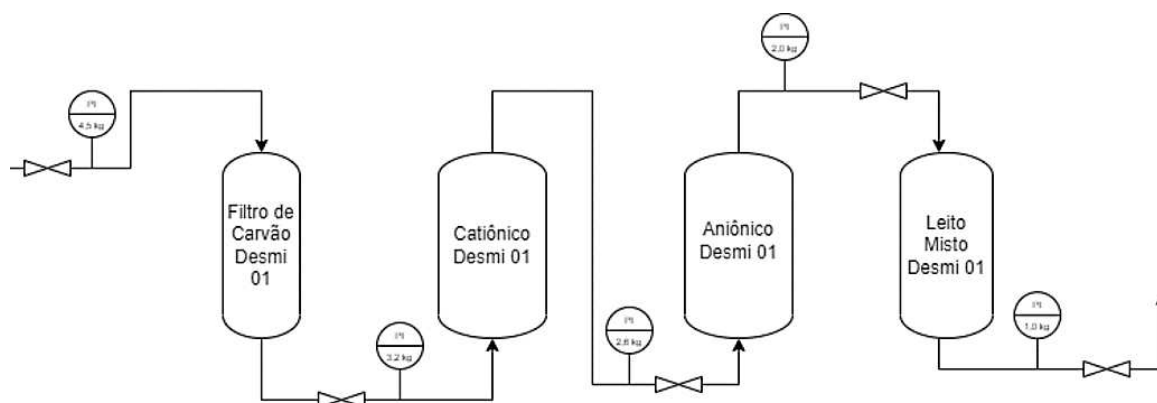
Figura 2 – Sistema de Desmineralização de Água – Unidade Gasa – Linha 2



Fonte: Aatoria Própria, 2022.

A Estação de Tratamento de Águas, local onde foi realizado o trabalho, contém duas linhas de Sistema de Desmineralização, com capacidade unitária de tratar $60 \text{ m}^3/\text{h}$, compostos por dois filtros de carvão, dois vasos com resinas catiônicas, dois vasos com resinas aniônicas e dois leitos mistos contendo as duas resinas, representados na Figura 3 e descritos a seguir.

Figura 3 – Fluxograma do Sistema de Desmineralização.



Fonte: Autoria Própria, 2023.

As Linhas 01 e 02 da Desmi se encontravam operando com baixa vazão, menor que $50 \text{ m}^3/\text{h}$, e o manômetro indicava um aumento da pressão de entrada, acima do limite nominal de $4,8 \text{ kgf/m}^2$. Foi possível observar oscilações nas vazões de operação, de 30 a $50 \text{ m}^3/\text{h}$ e nas pressões da operação, de $5,0$ a $5,5 \text{ kgf/m}^2$.

Os Filtros de Carvão estavam com a pressão acima da nominal, operando entre $5,0$ a $5,5 \text{ kgf/m}^2$. Ao realizar a abertura do Filtro de Carvão da Desmi 01, foi identificado um acúmulo de matéria orgânica no vaso, a crepina em aço inoxidável estava quebrada na solda, e os tubos da cruzeta estavam com alto grau de corrosão. O Filtro de Carvão da Desmi 02 se encontrava também com crepinas quebradas.

A entrada dos Vasos Catiônicos da Linha 01 e 02 apresentavam acúmulo de areia, carvão e matéria orgânica, proveniente do escape do Filtro de Carvão, ocasionando o aumento da pressão do sistema e oscilações na vazão de entrada. Foram identificadas falhas no revestimento interno com ebonite ocasionando ruptura no costado. Nos Trocadores Aniônicos foram constatadas resinas catiônicas, devido à fuga do catiônico. Já nos Leitos Misto 01 e 02 não foram identificadas avarias.

Sendo assim, observou-se a necessidade de reunir as principais hipóteses afim de definir a causa raiz, para posterior estudos da influência de cada uma delas na produção nominal de água desmineralizada na planta da usina sucroalcooleira.

A partir do descritivo, este trabalho teve como objetivo manter a produção de água desmineralizada em vazão nominal para reposição de água das caldeiras na unidade Gasa – Raízen. Para tanto, foi realizada a identificação de todas as hipóteses que possam ter influenciado na redução da operação da Linha 01 de

Desmineralização de Água, desde a captação de água do poço ou rio, até chegar nas caldeiras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo Produtivo

A Raízen é uma empresa que abrange todos os processos produtivos desde o preparo de solo e plantação, até logística para exportação. Conta com as áreas nomeadas de Agrícola, responsável pela cana-de-açúcar na lavoura até chegar à moenda; Indústria, responsável pela moagem até o produto final; e Manutenção Automotiva, responsável pela frota de toda unidade.

O processo de produção do açúcar ou etanol, produtos finais da Unidade Gasa, inicia-se na indústria após a cana-de-açúcar ser colhida nas lavouras e descarregada nos hilos da moenda ou difusor. O caldo extraído da moenda ou difusor passa por várias operações unitárias, sendo a Figura 4 representa um resumo deste processo.

Figura 4 – Resumo processo produção de açúcar na Raízen



Fonte: Site Raízen, 2023

É possível descrever o processo de produção do açúcar e do etanol em oito etapas principais, sendo elas descritas adiante:

2.1.1 Tratamento de Caldo

A primeira etapa é o tratamento do caldo da cana-de-açúcar após ser moído, passa por um tratamento químico e térmico, com objetivo de remover as impurezas minerais e vegetais, que afetam negativamente os processos seguintes, reduzindo o rendimento do açúcar e etanol. O caldo recebe um tratamento com cal e é aquecido por uma série de seis trocadores de calor antes de ir para o decantador, as impurezas ficam decantadas ao fundo, chamado lodo. Este lodo é filtrado em um filtro prensa, onde se separa o caldo clarificado e a torta, subproduto utilizado como adubo nas lavouras. Nesta etapa, o caldo clarificado é misturado ao caldo separado do lodo, no decantador, parte dele é direcionado para a fábrica de açúcar e parte para a fermentação (MELO, 2022).

2.1.2 Evaporação do Caldo

O caldo clarificado é alimentado na evaporação com uma concentração com cerca de 83 a 86% de água, o processo consiste em retirar água do caldo afim de se obter xarope, com brix e temperatura adequadas para início do cozimento (DELGADO e CESAR, 1976).

2.1.3 Cozimento e Cristalização

O xarope produzido na etapa anterior passa pelo cozimento, realizados em cristalizadores, evaporadores de simples efeito. Na primeira fase, de cristalização da sacarose, o xarope é concentrado sob vácuo até o grau de supersaturação. A massa depois de ser cozida em faixas de temperatura de 65-70°C é enviada para os tanques de cristalização e permanece mantida sob agitação lenta até o início do próximo processo (MACHADO, 2012).

2.1.4 Centrifugação do Açúcar

A massa obtida pelo cozimento e cristalização na etapa anterior é centrifugada, para que haja a separação dos cristais de açúcar do mel, realizado por turbinas centrífugas, este mel pode ser direcionado para alimentação no cozimento ou para a alimentação da fermentação (MACHADO, 2012).

2.1.5 Secagem do Produto

Os cristais de açúcar separados na centrifugação possuem alta umidade, o que acelera sua deterioração podendo gerar perdas. Por este motivo, é necessário realizar a secagem afim de se obter níveis de 0,1-0,2% de umidade. O secador de açúcar consiste de um aquecedor de ar e um ventilador responsável por circular contracorrente à movimentação do açúcar no seu interior (MACHADO, 2012).

2.1.6 Fermentação

Em contrapartida, o caldo clarificado é direcionado a um tanque pulmão para preparo do mosto, onde é misturado com mel, subproduto da centrifugação e água, em diferentes proporções afim de obter uma concentração de ART (Açúcares Redutores Totais) de 20°Brix. O mosto é alimentado nas dornas de fermentação juntamente com o levedo tratado, para início do processo de fermentação em batelada, com duração próxima de 8 horas. O final da fermentação é identificado quando não há mais redução do grau Brix em um período de uma hora (SONEGO, 2016).

2.1.7 Centrifugação Vinho Levedurado

Assim como no açúcar, na fermentação ocorre a centrifugação para separar o levedo do vinho, produto da fermentação dos açúcares do mosto, etapa que torna possível o reciclo e reaproveitamento das células de levedura, com intuito de aumentar a produtividade do processo fermentativo sendo esta operação em batelada. O fermento após esta etapa passa por um tratamento com ácido e retorna ao processo, e o vinho é direcionado para a coluna de destilação (SONEGO, 2016).

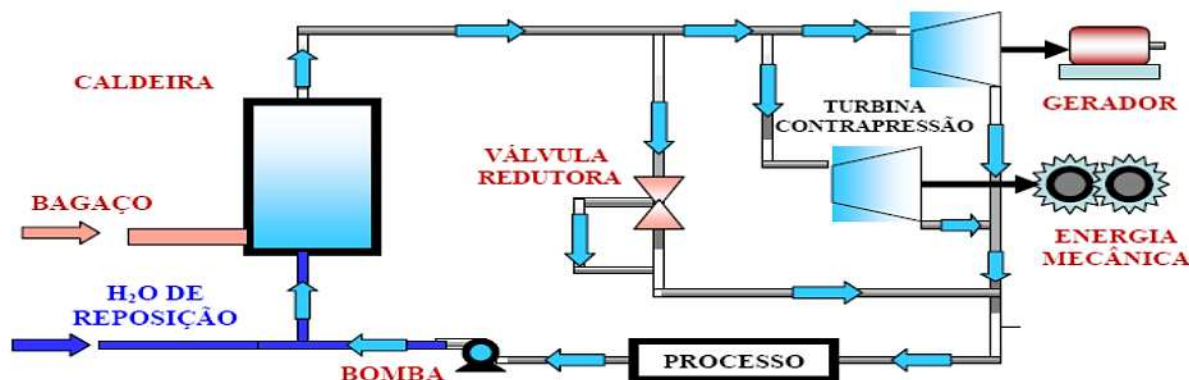
2.1.8 Destilação

O vinho é alimentado na coluna de destilação e por meio de transferências de calor e massa com o vapor, ocorre a separação do etanol, substância mais volátil presente no vinho. Os aparelhos de destilação são compostos por bandejas ou pratos, perfurados e são capazes de misturar e prover caminhos para que o vapor alcóolico suba e o líquido que desce da coluna mantendo contato entre si, permitindo a separação do vapor produzido na troca de calor e massa com o líquido. A destilação separa o etanol do vinho, resultando uma mistura hidroalcoólica impura, flegma e no fundo da coluna, a vinhaça. Estes últimos são subprodutos, sendo a primeira utilizada na lavoura como adubo assim como a torta, enquanto a flegma é utilizada como fluido de troca térmica para realização de assepsia nas linhas de mosto (ZARPELON, 2020).

2.2 Geração de Vapor

O subproduto da extração do caldo, operação unitária da moenda, é o bagaço da cana-de-açúcar. Nas plantas sucroalcooleiras, o bagaço é empregado como combustível nas caldeiras, sendo responsável pela geração de vapor demandado pela usina. A cogeração de energia é uma atividade essencial nas usinas, pois tem como finalidade atender a necessidade de energia térmica e mecânica, utilizando bagaço como combustível, a priori considerado como resíduo, conforme Figura 5.

Figura 5 – Diagrama padrão de cogeração em usinas de açúcar e álcool.



Fonte: Dantas, 2008.

Dependendo do tamanho da planta, o processo produtivo demanda vapor de baixa ou alta pressão para processos que necessitam do calor, como tratamento de caldo, evaporação e destilaria (NOVACANA, 2023).

O vapor gerado pela queima do bagaço nas caldeiras, chamado vapor vivo, é responsável pelo acionamento direto das turbinas nos sistemas de preparo de cana-de-açúcar e extração de caldo. Estas, por sua vez, geram energia mecânica aos desfibradores e ternos da moenda (NOVACANA, 2023).

Os geradores de vapor, ou comumente conhecidos como caldeiras, são vasos de pressão fechados que produzem e acumulam vapor de água em pressões maiores da atmosférica utilizando fonte externa de calor. Pode-se produzir vapor saturado ou vapor úmido, utilizado em processos industriais; ou vapor superaquecido ou vapor seco, utilizados para geração de energia mecânica para movimentação de turbinas de geração de energia elétrica. Conforme NR-13 são categorizadas de acordo com a faixa de pressão de operação, em:

- Categoria A: pressão de operação igual ou superior a 1960 kPa;
- Categoria C: pressão de operação igual ou inferior a 588 kPa e capacidade inferior ou igual a 100 L;
- Categoria B: caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores (SANTOS, 2018).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), as caldeiras podem ser classificadas de acordo com a faixa de pressão demandada pela planta industrial (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação das caldeiras de acordo com faixa de pressão.

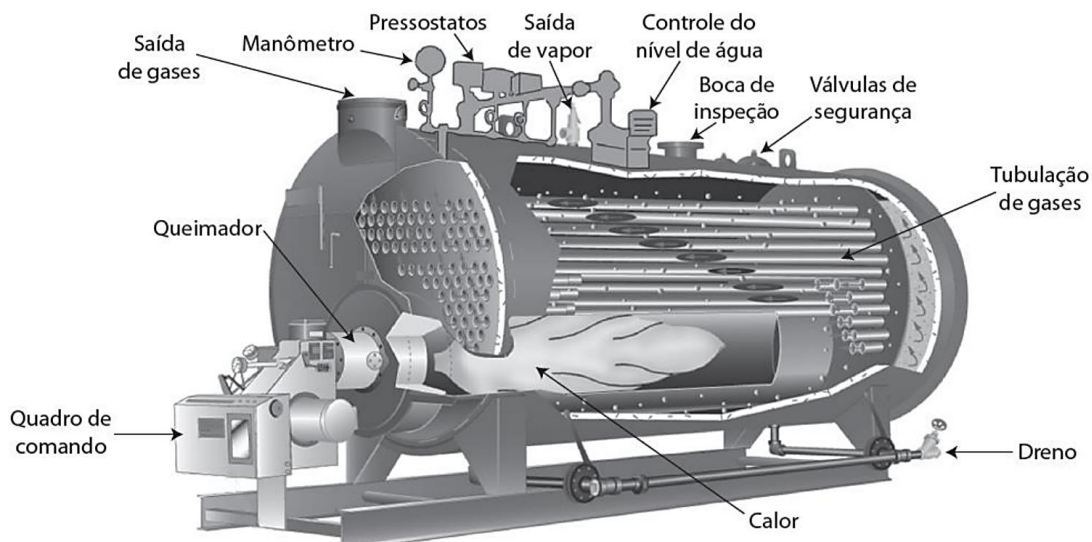
CATEGORIA	PRESSÃO (Psi)	kgf/cm²
Baixa Pressão	100 - 400	7 - 28
Média Pressão	400 – 800	28 - 56
Alta Pressão	800 – 3000	56 - 211
Pressão supercrítica	Acima de 3000	Acima de 211

Fonte: ANA, 2009

As caldeiras, em sistemas de geração de vapor, são equipamentos que geram trabalho nas turbinas pela ação da vaporização do fluido de trabalho ao receberem fornecimento de calor, conhecido como ciclo termodinâmico de Rankine. A caldeira compõe a geração de vapor do ciclo, a turbina é responsável por gerar trabalho, o condensador, condensa o vapor e para finalizar, a bomba que garante a alimentação

da água que retorna à caldeira. Na Figura 6 é possível identificar os componentes de uma caldeira de vapor (SANTOS, 2018).

Figura 6 – Componentes principais da caldeira de vapor.



Fonte: SANTOS, 2018

Ainda segundo Santos (2018), os dispositivos de segurança (Tabela 2) são de extrema importância na planta de geração de vapor, para assegurar e indicar variações nos parâmetros de operação. Os danos causados pela ausência desses dispositivos podem ser superaquecimento, deformação de tubos, vazamentos e até mesmo explosões.

Tabela 2 – Funções dos dispositivos de segurança de caldeira de vapor.

Dispositivos de Segurança	Função
Manômetros	Indicar a pressão do vapor acumulado
Válvula de Segurança	Evitar elevação de pressão acima da admissível
Injetor de água	Sistema de alimentação de água para evitar o superaquecimento por baixo nível
Indicador de nível	Visores para leituras de nível

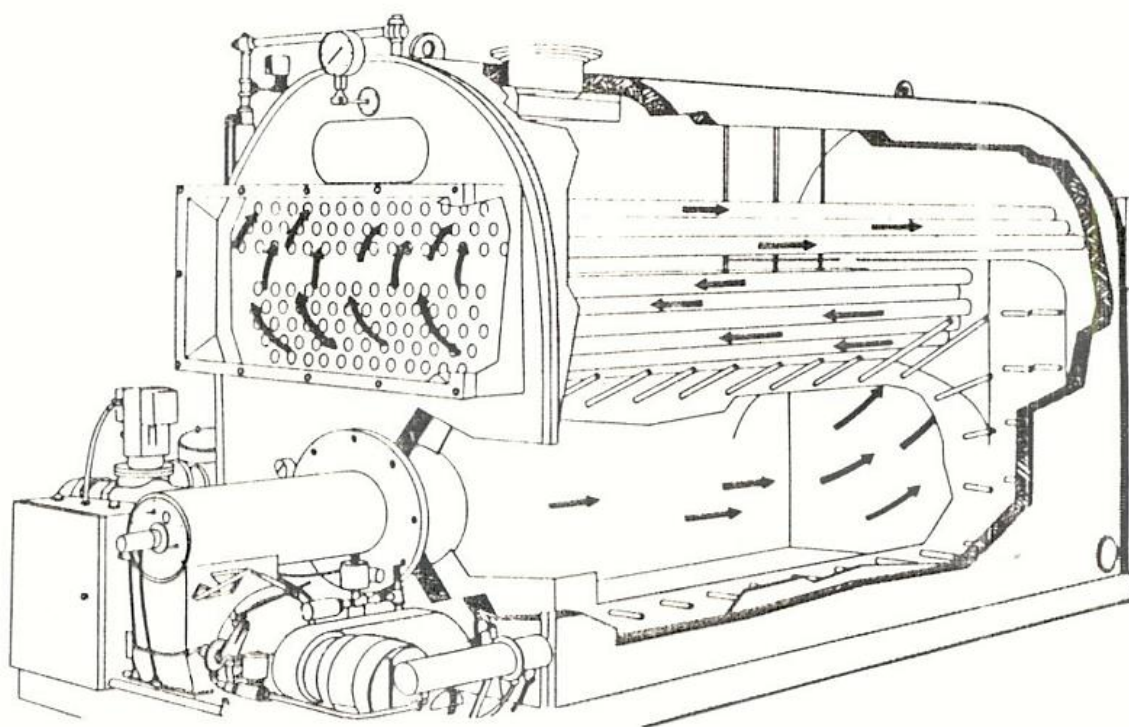
Fonte: Santos, 2018

A seguir serão descritos os principais tipos de caldeiras que compõem um sistema de geração de vapor.

2.2.1 Tipos de Caldeiras

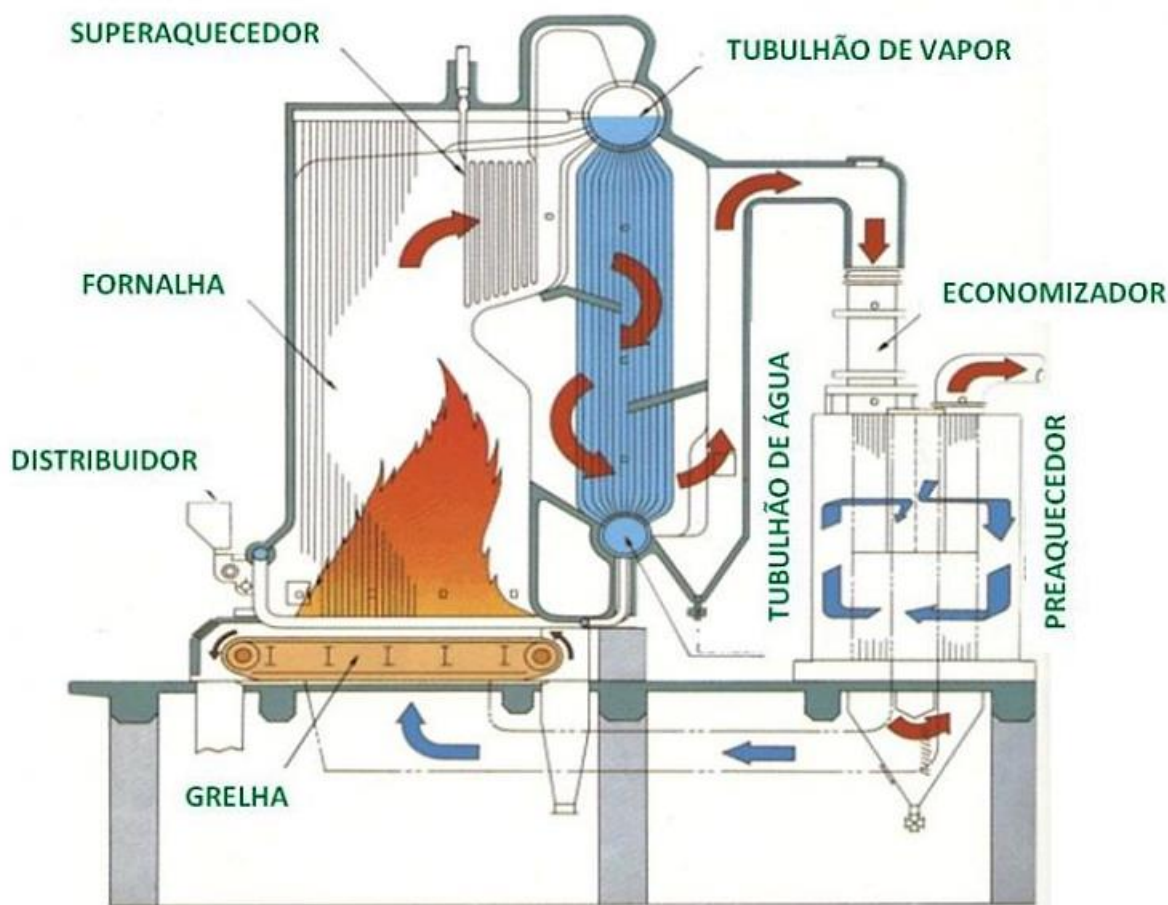
As caldeiras que constituem o sistema de geração de vapor podem ser classificadas como aquatubulares, flamotubulares e elétricas. Para pequena demanda de vapor, utiliza-se as caldeiras flamotubulares, representada pela Figura 7, em que a fonte de calor está presente no interior dos tubos e a água que será vaporizada está por fora dos tubos. Diferentemente nas caldeiras aquatubulares, representada pela Figura 8, a água está dentro dos tubos e a fonte de calor está externa a eles, o transporte de fluidos acontece devido à diferença de pressão entre as colunas líquidas e as correntes de convecção. As caldeiras elétricas convertem diretamente energia elétrica em energia térmica utilizando resistências, sua utilização é restrita, pois há apenas a liberação de vapor saturado, demandam energia elétrica em abundância e são projetos onerosos (LEITE; MILITÃO, 2008).

Figura 7 – Caldeira flamotubular.



Fonte: Silva, 2012

Figura 8 – Caldeira aquatubular fixa vertical.



Fonte: Martinelli, 2004

Para a definição da estrutura de geração de vapor ideal para o projeto é necessário realizar estudos para seguir normas e códigos vigentes no País e em conjunto, aproveitar a energia em potencial oferecida pela planta industrial.

2.3 Água de Alimentação

Realizar análises da água que alimentará caldeiras é imprescindível para o efetivo funcionamento destas, pois é por meio das análises que se torna possível a identificação de impurezas e a escolha assertiva do tratamento a se utilizar.

A água é um recurso natural essencial para todos os meios de vida, vegetais e animais, é a substância mais crítica e importante para a vida humana, além de estar presente no corpo humano em sua maioria, é reguladora de temperatura garantindo todas as funções orgânicas. Na indústria, a água é utilizada para diversas finalidades e têm influência direta e indiretamente a qualidade do produto (GAMA, 2017).

A água em seu estado líquido natural não é pura, pois ao entrar em contato com o ar e devido à sua capacidade de dissolução, dissolve oxigênio, nitrogênio, gás carbônico, entre outros, nas condições normais de temperatura e pressão. Neste grupo também estão as águas da chuva, pois retém poeira, fumaça e vapores em suspensão. Já em contato com o solo, como é o caso das águas fluviais e poços artesianos, bactérias, microrganismos, matérias orgânicas e minerais são incorporados à água. Em grande maioria, os constituintes dissolvidos ou em suspensão são íons, sais, gases, compostos orgânicos e matéria coloidal. As impurezas contidas nas águas podem ser classificadas em sólidos em suspensão, gases dissolvidos, sais dissolvidos, sílica e matéria orgânica, conforme Tabela 3 (GAMA, 2017).

Tabela 3 – Classificação das impurezas encontradas nas águas industriais.

CLASSIFICAÇÃO	IMPUREZAS
SÓLIDOS DISSOLVIDOS	Sais de cálcio, magnésio e ferro, sílica, bicarbonatos, carbonatos, cloretos e sulfatos
SÓLIDOS EM SUSPENSÃO	Materiais particulados, afetam na turbidez da água
GASES DISSOLVIDOS	Oxigênio, gás carbônico, amônia, gás sulfídrico e cloro
MICROORGANISMO	-

Fonte: Dantas, 1998.

Os sólidos em suspensão são as impurezas que não são dissolvidas em água, como areia, argila, sílicas, bactérias, resíduos industriais, vegetais e animais. Estes podem ainda ser divididas em matérias decantáveis, as quais ao serem mantidas em repouso se sedimentam espontaneamente; e matérias coloidais, fenômeno onde as partículas permanecem em suspensão (GAMA, 2017). A água é o fluido utilizado em sistema de geração de vapor, uma vez que possui propriedades solventes, capacidade de troca térmica eficiente, e transporte de partículas (SPERLING, 2005).

A água de abastecimento de sistemas de geração de vapor industriais pode ser captada de diferentes fontes, porém, as mais comuns são as águas subterrâneas, provenientes de poços ou poços artesianos, caracterizadas por possuírem alta

quantidade de sais dissolvidos; e água de superfícies, oriundas de rios ou lagos, com qualidade não constante, pois depende das condições climáticas, possuem maior turbidez e maior quantidade de sólidos suspensos. Para a utilização efetiva para produção de vapor, as águas oriundas dos dois tipos de captação devem ser tratadas seguindo especificações e parâmetros pré-definidos, dependendo da classificação da caldeira na planta (SANTOS, 2018). O estudo da planta de geração de vapor em questão necessita da água desmineralizada, ou seja, água que não possua nenhum íon ou sais dissolvidos nela.

Para utilização das águas para consumo humano, irrigações e plantas industriais, é necessário conhecer e definir alguns parâmetros de qualidade das águas, sendo os principais deles descritos a seguir.

2.3.1 Dureza

A dureza é o parâmetro que define a quantidade de minerais solúveis em água, tais como cloreto de sódio, que diferentemente de sais de cálcio e magnésio, não são responsáveis pelas incrustações nas tubulações industriais. Estes últimos se encontram presentes em águas subterrâneas oriundos da dissolução lenta do calcário em água. Os sais de cálcio e magnésio ao entrarem em contato com a água se tornam insolúveis e são precipitados dependendo da temperatura, causando incrustações comumente encontradas em trocadores de calor, conforme mostrado na Figura 9. A precipitação de cálcio e magnésio é diretamente relacionada com a temperatura, ocorrendo geralmente nos trocadores de calor onde a água está em temperatura ambiente e vai receber calor da troca térmica (GAMA, 2017).

Figura 9 – Incrustações causada por sais de cálcio e magnésio.



Fonte: Gatti, 2022

A dureza, portanto, é o teor de cálcio e magnésio encontrado na água. O abrandamento é o processo mais utilizado industrialmente para a remoção e redução da dureza da água. A água abrandada é de extrema importância para a planta de geração de vapor da indústria (GAMA, 2017).

2.3.2 pH

Todo sistema de utilização de água faz uso do pH como parâmetro fundamental para controle químico, pois a partir dele é possível obter a indicação de diferentes problemas como corrosão, incrustação, crescimento bacteriano entre outros (GAMA, 2017).

2.3.3 Alcalinidade

O parâmetro da alcalinidade surge quando há a dissolução do gás dióxido de carbono (CO_2) em água, sendo o ácido carbônico, um ácido fraco, produto dessa reação. Este ácido em contato com algum agente alcalino presente no meio se converte no íon carbonato, sendo as incrustações nas tubulações de trocadores de calor e geradores de vapor o maior problema que este íon interagindo com cálcio, por exemplo, pode oferecer (GAMA, 2017).

2.4 Tratamento da água

Como citado, o tratamento necessário para a água de abastecimento de sistemas de vapor depende do tipo de caldeira, sua pressão nominal, do tipo da água, demanda de vapor e forma de utilização. O tratamento consiste em remover substâncias, sais, íons e impurezas que comprometem o funcionamento das caldeiras. Alguns exemplos de tratamento de água são descritos na sequência.

2.4.1 Clarificação

O primeiro tratamento utilizado na maioria das indústrias é a clarificação feita em etapas, sendo elas coagulação, floculação e sedimentação, respectivamente. A coagulação consiste em uma reação química provocando a união de partículas de impurezas, tornando-as maiores e possibilitando sua retirada por processos mecânicos de filtração, sem alterar a qualidade da água. Na floculação, em sua maioria das vezes, ocorre a adição de um polímero orgânico, provocando a aglomeração dessas partículas maiores pelas interações moleculares que se tornam mais fortes. Consequentemente, após os dois tratamentos químicos citados, as partículas se sedimentam e são retiradas pelo processo físico de filtração (ZARPELON; AZZOLINI, 2015).

2.4.2 Filtração

A filtração é o processo de absorção (física ou química) de remoção mecânica das partículas que sofreram sedimentação (ZARPELON; AZZOLINI, 2015).

2.4.3 Abrandamento

Segundo ANA (2009), o processo de abrandamento é a remoção de íons de Ca e Mg presentes na água em forma de bicarbonatos, sulfatos e cloretos. Existem três processos de abrandamento de água, porém o utilizado pela Unidade Gasa – Raízen é a troca catiônica e aniônica por meio de resinas em um vaso de pressão (ZARPELON; AZZOLINI, 2015).

2.4.4 Desmineralização

A desmineralização ou deionização é um processo utilizado e recomendado para águas utilizadas em caldeiras de alta pressão, visando remover em sua totalidade os íons presentes na água. A água passa em três colunas de pressão,

sendo que a primeira delas contém resinas catiônicas na forma de H^+ , a segunda contém resinas catiônicas na forma de OH^- (ZARPELON; AZZOLINI, 2015).

As resinas encontradas nos trocadores aniônicos e catiônicos, são estruturas sintéticas insolúveis na água, possuem aproximadamente 0,5 mm de diâmetro, e possuem a propriedade de trocar ou absorver íons de mesma carga elétrica. Neste tratamento, os íons de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ são substituídos por íons de hidrogênio H^+ nos trocadores catiônicos, sendo que os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- são substituídos por íons hidroxila OH^- , nos trocadores aniônicos (ALMEIDA, 2002).

As colunas catiônicas e aniônicas periodicamente se esgotam ao chegarem no fim de um determinado volume tratado (ciclo), e necessitam de um processo chamado regeneração. No ciclo de regeneração das resinas catiônicas é utilizado uma solução ácida, podendo ser uma solução de ácido sulfúrico ou ácido clorídrico, provocando a troca de íons, devolvendo os cátions H^+ das resinas que estavam esgotadas. O mesmo acontece nas colunas aniônicas para a restauração das resinas aniônicas, porém, é utilizado uma solução de soda para devolver os ânions de OH^- (ANA, 2009).

As resinas possuem uma vida útil de 5 a 6 anos, perdem gradualmente sua capacidade de troca iônica e são sensíveis a substâncias oxidantes e matéria orgânica. Por isso, a água antes de receber o tratamento pelas trocas aniônicas, necessita receber uma pré-cloração para eliminação da matéria orgânica, e uma filtragem com carvão ativado, afim de eliminar o cloro residual (ALMEIDA, 2002).

Após realizar o levantamento teórico na literatura dos possíveis problemas e reais necessidades da planta de geração de vapor pelas caldeiras, foi possível levantar as hipóteses através da metodologia de análise e ferramenta da qualidade apresentada no tópico a seguir.

3 PESQUISA E ANÁLISE DAS HIPÓTESES

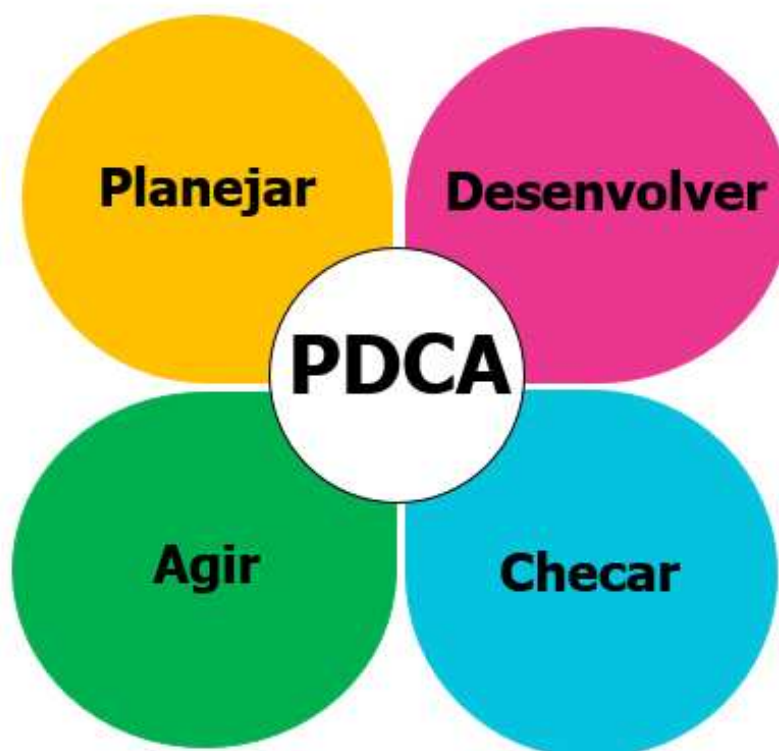
3.1 Metodologia de Análise

Com o intuito de analisar a causa raiz e as possíveis hipóteses para o evento da falta de água desmineralizada na produção de vapor da Unidade Gasa - Raízen, foi realizado dentro da empresa um PDCA com análise crítica à cada ponto observado.

O PDCA ou Ciclo PDCA, representado na Figura 10, é uma ferramenta da qualidade para melhoria contínua de um determinado processo ou produto. A sigla significa *Plan* (planejar), *Do* (fazer), *Check* (checar) e *Act* (agir) que são as etapas a

serem seguidas em ciclo, de forma repetida, para colocar a ferramenta em prática, afim de obter resultados no médio e longo prazo.

Figura 10 – Ciclo PDCA



Fonte: Aatoria Própria, 2023.

Esta ferramenta é muito utilizada nas empresas pela quantidade de ajustes e desenvolvimento profissional e pessoal, uma vez que é necessário estratégia e estudo para a definição da causa raiz. Por meio das etapas disponibilizadas pelo Ciclo PDCA foi possível realizar o esclarecimento do problema, identificar a causa raiz, estabelecer uma meta assertiva e implementar contramedidas, conforme será apresentado nas etapas a seguir:

3.1.1 Etapa 1: Esclarecimento do Problema

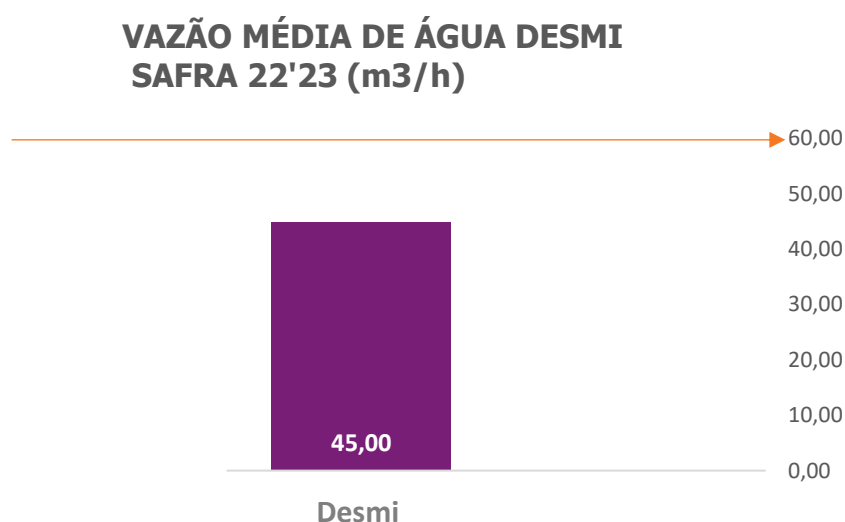
Objetivo Raízen – Produzir e comercializar etanol, açúcar, combustíveis e bioenergia mobilizando pessoas e potencializando negócios por meio da energia, comprometida sempre com a segurança, ética e sustentabilidade.

Objetivo Unidade Gasa – Gerar soluções sustentáveis que contribuam para o desenvolvimento da empresa, além de alavancar as metas de segurança, produtividade, qualidade e eficiência para produção de etanol e açúcar.

Objetivo do Setor – Realizar produção de água desmineralizada para atender a demanda da caldeira.

A Situação Atual de vazão de água desmineralizada era de 45 m³/h e a Situação Ideal era de 60 m³/h de vazão, como representado na Figura 11.

Figura 11 – Vazão média de água Desmi Safra 22'23 e Vazão Ideal Nominal.



Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

3.1.2 Etapa 2: Estratificação do Problema

O Déficit de vazão de água Desmineralizada para a produção nominal para a caldeira era de 15 m³/h. Na Figura 12 é possível avaliar a produção de água Desmineralizada desde o incidente no mês de junho 2022 até outubro 2022, quando foi realizado este trabalho.

Figura 12 - Produção Água Desmineralizada de junho até outubro 2022.



Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

Com o intuito de identificar qual o Ponto de Geração do Problema e qual o Ponto de Ocorrência, foi realizado um estudo no fluxograma do processo de tratamento de água, conforme é possível observar na Figura 13.

Figura 13 – Estudo do fluxograma Ponto de Geração e Percepção do Problema.



Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

3.1.3 Etapa 3: Estabelecendo a Meta

Atingir e manter a operação de Desmineralização com uma vazão mínima de 55 m³/h para evitar a falta de água para reposição na caldeira até novembro de 2023.

3.1.4 Etapa 4: Identificação Causa Raiz/Evidências

Na utilização da metodologia escolhida para o estudo de caso, ferramenta PDCA, foi possível dividir as evidências em Causa Material, Causa por Método, Causa

por Máquina ou Causa por Mão de Obra, como representado na Figura 14, e aplicar a ferramenta dos 5 porquês para determinação da Causa Raiz.

Figura 14 – Implementação dos 5 “porquês”



Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

3.2 Material

Foi identificado uma baixa eficiência no filtro de carvão, pois o mesmo se encontrava desgastado e com o prazo de validade de uso estava excedido, fato este que não foi constatada pois não existia um procedimento de avaliação do filtro de carvão. Na visita técnica em campo, o filtro de carvão foi encontrado conforme Figuras 15 e 16.

Figuras 15 e 16 – Evidências Filtro de Carvão.



Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

Constatou-se a existência de resinas catiônicas no filtro de carvão, por conta de um rompimento próximo ao espelho do vaso, ocasionado pelo aumento da pressão e estrutura desgastada. As Figuras 17 e 18 evidenciam o rompimento próximo ao espelho e o reparo realizado.

Figuras 17 e 18 – Evidências Rompimento Filtro de Carvão.



Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023s

3.3 Método

A água filtrada oriunda da ETA (Estação de Tratamento de Água) se encontrava com baixa qualidade pela falta de dosagem de cloro. Não foi possível identificar a falta de cloro na água, possivelmente porque a frequência analítica de análise deste parâmetro não estava sendo seguida corretamente, pela falta de conhecimento dos operadores da ETA.

Ainda, houve uma falha na identificação da necessidade e dosagem correta pela falta do equipamento e procedimento chamado *Jar test*, representado na Figura 19. No *Jar test* é realizado o ensaio de floculação, que é um procedimento que auxilia na garantia do desempenho das ETAs, uma vez que permite a identificação da faixa de pH que oferecerá as melhores condições de floculação, com o intuito de otimizar

a dosagem de cloro, neste caso (FUSATI, 2022). Portanto, é possível concluir que houve uma falha de procedimento para mínima dosagem de insumos.

Figura 19 – Equipamento Jar test



Fonte: FUSATI Filtros e Tratamento de Água, 2022

Foi observado ainda que houve uma falha no controle das perdas de carga nos vasos de pressão aniônicos e catiônicos. Tal fato foi constatado na operação pois não havia rotina de inspeção e nem procedimento para acompanhamento das perdas de cargas.

3.4 Máquina

Não foi evidenciado nenhuma causa originada da falha do equipamento.

3.5 Mão de Obra

A operação não havia conhecimento técnico, específico e treinamento do POP (Procedimento Operacional Padrão). Foi observado que houve abertura do *by-pass* de água bruta para os vasos da Desmineralização, com o intuito de aumentar a vazão de água e suprir a demanda das caldeiras.

Após todas as hipóteses levantadas, foram listadas as possíveis soluções para os problemas encontradas na análise do ciclo PDCA na Usina unidade Gasa – Raízen.

4 SOLUÇÕES

A partir de uma equipe de investigação do incidente, foram tomadas algumas ações corretivas e preventivas. Os resultados da produção de água foram acompanhados mensalmente nos anos Safra 22'23 e 23'24.

4.1 Etapa 5: Identificação das Contramedidas

Nesta etapa da metodologia, foi possível encontrar e definir qual a contramedida mais eficaz para a resolução da causa raiz encontrada na Etapa 4. Os critérios de seleção foram: eliminação da causa raiz, custo, pessoas/tempo, segurança, qualidade, capacidade de trabalho, dificuldade técnica e avaliação geral. As propostas neste trabalho estão apresentadas na Figura 20, assim como os critérios de seleção.

Figura 20 – Identificação das Contramedidas

Propostas	Critérios de Seleção							
	Elimina causa-raiz	Custo	Pessoas/ Tempo	Segurança	Qualidade	Capacidade de Trabalho	Dificuldade técnica	Avaliação Geral
Criar procedimento de dosagem de insumo	●	●	●	●	●	●	●	●
Instalar sistema de dosagem de cloro por pastilha	▲	✗	●	●	✗	▲	●	✗
Instalar filtro bags	●	✗	●	●	●	●	✗	✗
Retirar válvula de bypass	✗	●	✗	●	●	●	●	✗
Fazer gestão das trocas dos elementos filtrantes	▲	●	●	▲	●	●	▲	▲
Reciclagem do treinamento do POP	▲	●	●	●	●	●	●	▲

Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

Foram propostas seis contramedidas junto à equipe de estudo, e aquela que mais atendeu aos critérios de seleção foi a criação de procedimentos de dosagem de insumo. Tal fato foi concluído visto que na Etapa 4 ficou definido que a causa raiz foi a falta de procedimento de avaliação e análise de parâmetros, falta de treinamento, falta de procedimento para mínima dosagem de insumos, conforme mostra a Figura 20.

4.2 Etapa 6: Implementação das Contramedidas

A implementação das contramedidas definidas com a equipe de pesquisa, contou com a colaboração de colaboradores de outras áreas. Foi possível criar um cronograma de contramedidas, responsáveis, período e prazo para cada ação, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Cronograma de implementação de contramedidas

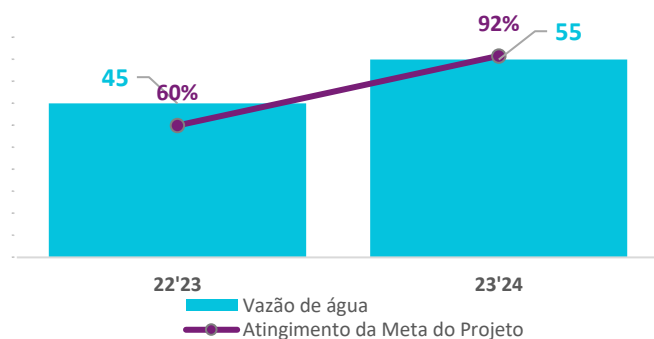
raigen		CRONOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO		
Problema	Contramedida	Resp.	Início	Término
Baixa qualidade de água filtrada	Realizar acompanhamento das dosagens de Cloro, garantindo 0,5 de cloro antes do filtro de carvão	Davi	01/nov	30/nov
	Compra do Jartest	Viviane Nunes	01/nov	30/nov
	Compra da bomba de Cloro	Viviane Nunes	01/ago	20/jan
Vazamento do vaso catiônico	Troca do vaso catiônico	Davi	01/nov	21/mar
Monobra de desvio de água bruta para desmi	Bloqueio permanente da válvula de água bruta	Davi	01/dez	30/mar
Treinamento POP	Realizar treinamento e garantir conhecimento em campo de todos os colaboradores e operadores da ETA	Viviane Nunes	01/abr	15/abr
Tempo de uso do material	Fazer um book da Desmi, para acompanhar todas as trocas de material.	Cristiane Oliveira	30/abr	06/out
Avaliação do carvão	Procedimento de avaliação de carvão	Everton	01/abr	01/nov
Dosagem de insumos	Fazer um check list para acompanhamento de dosagem de insumos	Cristiane Oliveira	01/abr	05/abr

Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

4.3 Etapa 7: Monitoramento de Resultados

Com a finalidade de acompanhar e monitorar os resultados obtidos após a implementação de cada contramedida, foi analisado mês a mês a produção de água desmineralizada da Unidade Gasa até o presente momento. Conforme a Figura 22, foi possível concluir que houve um aumento de 32% na produção de água desmineralizada para reposição de água das caldeiras, atingindo, portanto, uma vazão de 55 m³/h.

Figura 22 – Gráfico Produção de água desmineralizada m³/h Safra 23'24



Fonte: Projeto PDCA - Autoria Própria, 2023

4.4 Etapa 8: Padronizar Processos

A última etapa do Projeto utilizando o Ciclo PDCA como ferramenta de análise constou com a necessidade da padronização dos processos a partir do momento em que a causa raiz foi identificada e eliminada. Foi levado em consideração todas as ferramentas de melhoria contínua da qualidade que são utilizadas na Raízen, e ficou definida a necessidade da elaboração de um POP (Procedimento Operacional Padrão) da Operação da ETA e Desmi, criação de um *Book* de cada equipamento, afim de monitorar a troca dos elementos filtrantes.

A partir do exposto, foi possível com o levantamento das hipóteses, estudo do material teórico e implementação das contramedidas, atingir a meta de produção nominal das linhas da Desmi afim de que não falte água para a reposição nas caldeiras.

5 CONCLUSÃO

Baseando-se nas avaliações, relatórios e visitas em campo que foram realizadas durante o presente trabalho, foi possível identificar algumas falhas operacionais pontuais, e também a deficiência na gestão da manutenção da ETA e Desmi.

Ao analisar as propostas corretivas sugeridas, concluiu-se que a causa raiz do incidente do rompimento do vaso aniônico, e conseqüentemente parada na planta por falta de água Desmi para reposição de água da caldeira, foi a falta de gestão da qualidade da água. Tal fato ocorreu pois não houve um monitoramento dos parâmetros da água durante o seu fluxograma de tratamento.

A ferramenta PDCA foi utilizada como iniciativa de um dos programas de excelência internos da Raízen, afim que de o time da Qualidade Integrada pudesse identificar as falhas e corrigi-las.

Portanto, foi possível concluir que a metodologia utilizada para a análise de causas da falha operacional no acompanhamento dos parâmetros do tratamento de água e deficiência na gestão de manutenção se revelou eficaz, uma vez que garantiu que a produção do ano Safra 23'24 alcançasse seus objetivos, conforme a meta estabelecida, garantindo a produção nominal das duas linhas de desmineralização para reposição de água nas caldeiras de alta pressão da planta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Giovana Santos et al. Melhoria de Desempenho Ambiental em uma Unidade de Tratamento de Água de uma Indústria. VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2002. Disponível em <https://www.researchgate.net/profile/Giovana-Almeida/publication/253234918_Melhoria_de_desempenho_Ambiental_em_uma_Unidade_de_Tratamento_de_Agua_de_uma_Industria/links/5488838b0cf2ef3447909e05/Melhoria-de-desempenho-Ambiental-em-uma-Unidade-de-Tratamento-de-Agua-de-uma-Industria.pdf>. Acesso em maio 2023.

BAZZO, Edson. Geração de vapor. 2. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 1995. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/262336764/Bazzo-E-Geracao-de-Vapor-2a-Edicao>>. Acesso em 9 de maio de 2023.

DANTAS, Evandro. Geração de vapor e água de refrigeração: falhas, tratamento, limpeza química. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO), 1988. Disponível em: <<https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/6554>>. Acesso em 9 de maio de 2023.

DANTAS, G. de A; CASTRO, N. J. de. O Uso do Bagaço e da Palha: Bioeletricidade ou Etanol Celulósico? - I Workshop do INFOSUCRO sobre Impactos Econômicos e Tecnológicos da Indústria Sucoalcooleira no Brasil. Rio de Janeiro, novembro de 2008. Disponível em: <<https://engemausp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/271.pdf>> , Acesso em 17 de dezembro de 2023.

DELGADO, A. A. e CESAR, M. A. A. Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana. Vol I II III. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, 1976. Disponível em <<https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/930/1/DESEMPENHO%20DE%20PROCESSAMENTO%20INDUSTRIAL%20DE%20CANA-DE-A%3%87%c3%9aCAR.pdf>>. Acesso em 16 de dezembro de 2023.

FUSATI, Filtro de Água – Jar Test – Ensaio de Flocculação, 2022. Disponível em: <https://www.fusati.com.br/jar-test-ensaio-de-floculacao/>. Acesso em 15 de agosto de 2023.

GAMA, Paulo Sergio Mendes. "CLARIFICAÇÃO, DESSALINIZAÇÃO E DESMINERALIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR PARA GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS." (2017). Disponível em: <<https://rosario.ufma.br/jspui/handle/123456789/1503>>. Acesso em 21 de maio de 2023.

GATTI QUÍMICA – Entenda tudo sobre incrustação – 2022. Disponível em: <<https://gattiquimica.com.br/blog/entenda-tudo-sobre-incrustacao/>>. Acesso em 10 de maio de 2023.

GRUPO HÍDRICA – Dureza da água: o que é e como ela influencia na qualidade. Disponível em: <<https://grupohidrica.com.br/dureza-da-agua/>>. Acesso em 03 de agosto 2023.

LEITE, Nilson Ribeiro; MILITÃO, Renato de Abreu. Disciplina de fabricação e montagem de caldeiras e trocadores de calor: tipos e aplicações de caldeiras. Escola Politécnica – Departamento Engenharia Mecânica. 2008. Disponível em: <http://lcsime.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf>. Acesso em 29 julho de 2023.

MACHADO, Simone Silva – Tecnologia da Fabricação do Açúcar – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Goiás – Campus Inhumas. 2012. Disponível em: <https://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/448/tecnolog_da_fabricacao_do_acucar.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. Acesso em 17 de dezembro de 2023.

MARTINELLI JR., Luiz Carlos - Geradores de vapor (Apostila). 2004. Acesso em: 17 de dezembro de 2023.

Melo, Daniel Mororó – Diagnóstico e proposta de melhoria do desempenho do processo produtivo de etanol em uma usina da Paraíba – Disponível em:

<<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/27047/1/TCC%20-%20Daniel%20Mororo.pdf>>. Acesso em 16 de dezembro 2023.

NOVACANA – Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/cogerao-como-funciona-producao-energia-eletrica>>. Acesso em 05 de agosto de 2023.

SANTOS, Enock Jabes do Nascimento. "A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeira." (2018). Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/4577>>. Acesso em 9 de maio de 2023.

SILVA, Daniel Fernando. Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção. 2012. 33f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Fesurv - Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2012. Acesso em 17 de dezembro de 2023.

SPERLING, Marcos Von. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Minas Gerais: SEGRAC, 2005. Disponível em: <https://www.academia.edu/39149408/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_qualidade_de_das_%C3%A1guas_e_ao_tratamento_de_esgotos>. Acesso em 9 de maio de 2023.

SONEGO, Jorge Luiz Silveira. Estudo da produção de etanol de sacarose por fermentação extrativa utilizando arraste com dióxido de carbono. São Carlos – SP. Tese Doutorado. Ufscar. 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/10273/TeseJLSS.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em 17 de dezembro de 2023.

ZARPELON, W.; AZZOLINI, J. C. - CALDEIRAS DE ALTA PRESSÃO: CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO TRATAMENTO DAS ÁGUAS DE ABASTECIMENTO. Unoesc & Ciência - ACET, [S. I.], v. 6, n. 2, p. 141–154, 2015. Disponível em: <<https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/6554>>. Acesso em 9 de maio de 2023.

ZARPELON, Florenal – Destilação do etanol – Livro Físico – Edição 1 – 489 páginas
– 2020.