

**FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ - FAACZ
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CESAR BORTOLINI VASSOLER
MARCIO JHONATAN ALMEIDA SILVA
PAULO HENRIQUE RUI DELUNARDO
RODRIGO ALVES MAGALHÃES**

CONTAMINAÇÃO POR SÍLICA NA TURBINA DE VAPOR

**ARACRUZ
2022**

**CESAR BORTOLINI VASSOLER
MARCIO JHONATAN ALMEIDA SILVA
PAULO HENRIQUE RUI DELUNARDO
RODRIGO ALVES MAGALHÃES**

CONTAMINAÇÃO POR SÍLICA NA TURBINA DE VAPOR

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenadoria do curso de engenharia mecânica da Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Daniel Otárola Tasaico

**ARACRUZ
2022**

**CESAR BORTOLINI VASSOLER
MARCIO JHONATAN ALMEIDA SILVA
PAULO HENRIQUE RUI DELUNARDO
RODRIGO ALVES MAGALHÃES**

CONTAMINAÇÃO POR SÍLICA NA TURBINA DE VAPOR

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de engenharia mecânica da Faculdades Integradas de Aracruz – FAACZ, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica.

COMISSÃO JULGADORA:

Componente da Banca Examinadora
Nome, titulação, assinatura e instituição a que pertence

Componente da Banca Examinadora
Nome, titulação, assinatura e instituição a que pertence

Componente da Banca Examinadora
Nome, titulação, assinatura e instituição a que pertence

Aracruz/ES, ____ de _____ de _____.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos primeiramente a Deus, que nos manteve firme até o final deste curso, abençoando a cada dia, a cada aula e a cada prova e semestre. Agradecer também aos nossos familiares que nos incentivaram e seguiram conosco cobrando a estudar cada vez mais, cobrando nossa dedicação e acreditando que chegaríamos ao fim desse incrível curso.

Agradecer também aos nossos professores que nos acompanharam desde o início, aqueles que passaram por esta instituição e deixaram suas lembranças e todos os professores e coordenadores que tiveram paciência e acreditaram que conseguiríamos.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso apresenta uma revisão bibliográfica sobre os problemas relacionados à contaminação da água de caldeira no processo de geração de vapor com sílica. Os principais riscos para as turbinas de vapor são considerados e um estudo de caso é analisado. Este mostra um caso ocorrido em uma empresa do setor de papel e celulose, além de mostrar como ele foi tratado e solucionado. Diversos métodos de contingência são sugeridos, alinhados com a referência técnica da TAPPI 0416 -05 de 2000.

Palavras-chaves: Turbina; Turbogenerador; Sílica; Contaminação de vapor.

ABSTRACT

This undergraduate thesis provides a survey of problems linked to the contamination of boiler water in steam generation, where we consider the main risks silica poses to steam turbines. Furthermore, we analyze a case study from a company in the pulp and paper sector, detailing how it was handled and solved. Finally, several contingency methods are suggested, in line with TAPPI 0416 -05 of 2000.

Keywords:turbine; turbo-generator; silica; steam contamination.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 01 - Partes componentes da turbina a vapor | 14 |
| Figura 02 - Princípios de Ação e Reação da turbina | 17 |
| Figura 03 - Ciclones e <i>scrubbers</i> , separadores de gotículas..... | 27 |
| Figura 04 - impactos da sílica no sistema..... | 31 |
| Figura 04 – Custos de geração..... | 38 |
| Figura 05 – Custo simulado geração..... | 38 |
| Figura 06 – Simulador de geração de energia elétrica por turbina..... | 39 |
| Figura 07 – Metodologia de cálculo..... | 40 |
| Figura 09 - Fluxograma do pré-tratamento da água..... | 43 |
| Figura 09 - Fluxograma osmose reversa | 44 |
| Figura 10 - Configuração da Osmose Reversa | 44 |
| Figura 11 - Espectrofotômetro PourThru | 47 |
| Figura 12 – Plano de contingência | 50 |
| Figura 13 – Plano de contingência seguindo orientações | 52 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 01 – Classificação de turbinas..... | 15 |
| Quadro 02 – Classificação de turbinas continuação..... | 16 |
| Quadro 02 - parâmetros de especificação da água desmineralizada..... | 28 |
| Quadro 03 - Degradações e forma de detecção..... | 41 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 01 - Relação Sílica x Pressão em condições de ph, TAPPI | 31 |
|-----------------------------------------------------------------------|----|

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2. | OBJETIVOS | 11 |
| | 2.1. OBJETIVO GERAL | 11 |
| | 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 11 |
| 3. | METODOLOGIA | 12 |
| 4. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| | 4.1. TURBINAS A VAPOR..... | 13 |
| | 4.2. IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA GERAÇÃO DE VAPOR | 17 |
| | 4.3. CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE VAPOR..... | 18 |
| | 4.4. RENDIMENTO GLOBAL..... | 19 |
| | 4.5. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA USADA NO TRATAMENTO | 19 |
| | 4.5.1. DISSOLUÇÃO..... | 22 |
| | 4.5.2. CAPACIDADE DE TROCA IÔNICA | 22 |
| | 4.5.3. QUELAÇÃO | 23 |
| | 4.6. PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA..... | 24 |
| | 4.6.1. ARRASTE DE VAPOR DE SÍLICA NA CALDEIRA..... | 25 |
| 5. | ESTUDO DE CASO | 32 |
| | 5.1. NECESSIDADES ENERGÉTICAS DA EMPRESA | 32 |
| | 5.2. VENTILADOR DE TIRAGEM INDUZIDA | 33 |
| | 5.3. SIMULADOR - TURBINA..... | 36 |
| | 5.4. MAJOR OVERHAUL..... | 42 |
| | 5.5. DESVIOS NO CONTROLE DE CONTAMINANTES | 45 |
| | 5.6. PROCEDIMENTO DE CONTINGÊNCIA SILICA – TAPPI..... | 48 |
| | 5.7. FONTE DE CONTAMINAÇÃO..... | 48 |

| | | |
|-----------|----------------------------------------|-----------|
| 5.8. | PLANO DE CONTINGÊNCIA..... | 49 |
| 6. | CONCLUSÃO | 53 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 54 |

1. INTRODUÇÃO

Considerado um dos maiores desafios operacionais na produção de vapor para a geração de energia utilizando-se turbogeradores, a volatilização da sílica em concentrações acima do limite de controle causa enormes problemas de incrustações e corrosão nos sistemas internos das caldeiras, turbinas e tubulações, afetando a eficiência dos equipamentos e trazendo ações e manutenções inesperadas (CLEASBY, J. L. (1990)).

Com a vaporização de água na caldeira, há um aumento na concentração das substâncias dissolvidas que permaneceram na fase líquida. Se forem ultrapassados os limites de solubilidade destas substâncias, elas podem se precipitar de forma aderente nas superfícies de troca térmica (paletas das turbinas, tubos do feixe de convecção, tubos de parede d'água, tubo da fornalha, ciclones, separador de gotículas, etc.) constituindo as incrustações (GENTIL, V. 2003).

Essas incrustações podem agravar a longo prazo a vida útil das turbinas afetando diretamente nas paletas e mecanismos internos causando vibrações, desbalanceamento, eventos de sobre velocidade, arraste de água ou perda de óleo lubrificante e inúmeros problemas que podem estar relacionados as incrustações, causando paradas emergenciais inesperadas, impactando diretamente na produção, ocasionando perdas financeiras imensuráveis, custos de manutenções e até mesmo gastos com compra de energia elétrica de distribuidora, necessários para manter todo o processo em funcionamento durante os reparos.

O presente trabalho mostra a importância de um bom tratamento da água, através de um estudo de revisão bibliográfica, e avaliação dos parâmetros de controle, para que a geração de energia não seja impactada por contaminações indesejadas gerando perdas de produção e custos de manutenção não planejados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

É o objetivo geral deste trabalho: realizar uma revisão bibliográfica dos riscos da contaminação da água de caldeira das turbinas de vapor com sílica e dos métodos de contingência.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São os objetivos específicos deste trabalho:

- a) Descrever as turbinas de vapor e seu funcionamento;
- b) Abordar a importância da qualidade da água nas plantas de vapor;
- c) Apresentar a problemática da presença de sílica na água de alimentação da caldeira;
- d) Relatar métodos de solução da contaminação com sílica;
- e) Exemplificar um caso pertinente ao estudo e sua proposta de solução.

3. METODOLOGIA

Este é um trabalho de revisão bibliográfica. A revisão bibliográfica traz estudos referenciados dos autores Lemos (2015), Pires et al. (2013), Lora e Nascimento (2004), Di Bernardo (1993), Cleasby (1990), Richister (2009), Lehrbuch Der Chemie (2010), Flora S. J. S. (2010), Buckman (1997), Habert ET (2006), Pohl (2006), Silva ET (2007), Drew Marine (1992), Rothbarth (2010), Cotton (1988), Blog Wortice (2020), Beebe (2003), e livros e artigos citados neste trabalho.

Para confecção desse trabalho foi utilizado pesquisas em biblioteca da faculdade, artigos, trabalhos, livros, pesquisas online em google acadêmico relacionados a turbina, tipos de turbinas, modo operacional de turbina, componentes de turbinas, problemas crônicos em turbinas, principais problemas que o vapor pode causar nos componentes das turbinas, geração de energia dos turbos geradores, eficiência energéticas e Major Overall turbogerador.

Além disso, também foi utilizado pesquisas em biblioteca da faculdade, artigos, trabalhos, livros, pesquisas online em google acadêmico relacionados a água na natureza, componentes contaminantes presentes na água, sílica presente na água e vapor, problemáticas da sílica no vapor, problemáticas da sílica na caldeira e turbina, estação de tratamento da água, pré-tratamento da água para caldeira, tipos de filtros de tratamento da água (filtro de areia, filtro de carvão, filtro cartuchos, filtro de membrana osmótica), tipos de produtos utilizados para tratamento adequado da água, resinas aniônicas e catiônicas, troca iônica e tempo de regeneração, leito misto, água desmineralizada, desaeração mecânica, produtos químicos utilizados para tratamento de caldeira e geração de vapor, água de alimentação de caldeira contaminada, limites de controle da água para caldeira, tipos de caldeiras, introdução a caldeira de recuperação, deposições e incrustações internas, geração de vapor, vapor saturado e superaquecido e contaminação no vapor.

Também foi realizado um estudo de caso tratando sobre as problemáticas da sílica nas turbinas de geração de energia, exemplificando métodos de contaminação e tratamento, avaliando os parâmetros e possíveis melhorias do sistema.

Durante as pesquisas, foi adotado critérios para facilitar as buscas e conclusão do trabalho, porém devido à grande quantidade de informações, todos os trabalhos que não mostravam a sílica como tema ou conteúdo eram excluídos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. TURBINAS A VAPOR

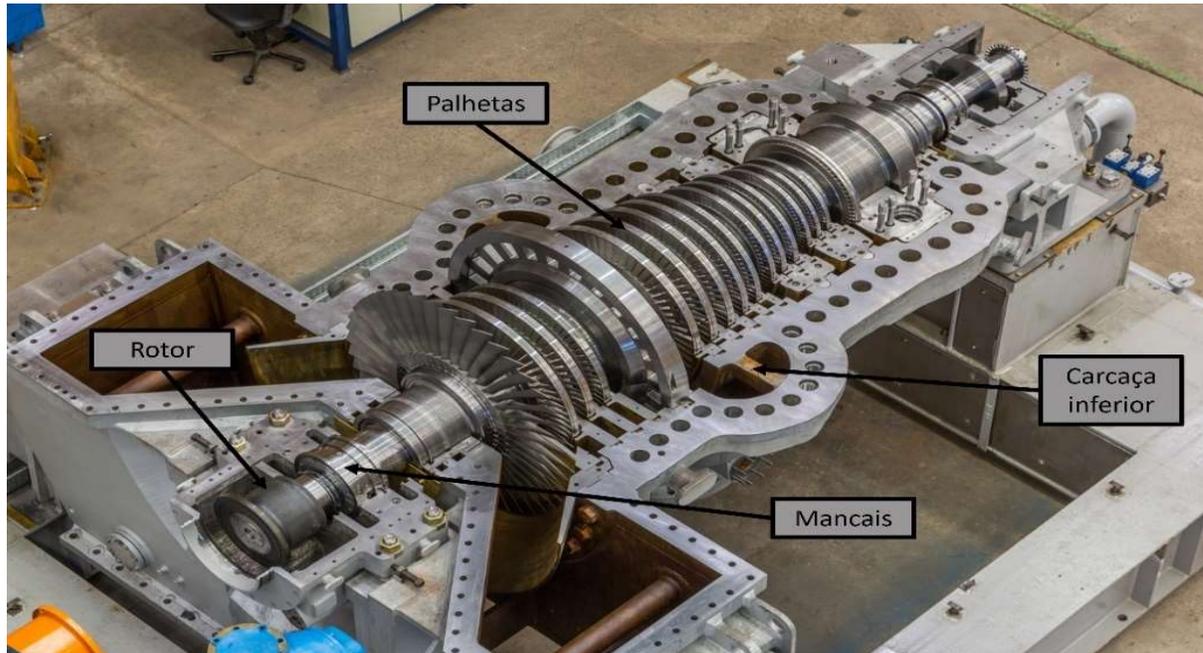
Segundo LEMOS (2015), turbinas a vapor são equipamentos que retiram energia térmica a partir do vapor pressurizado, utilizando o elevado calor latente a fim de armazenar grandes quantidades de energia na forma de potencial termodinâmico.

O procedimento de transferência de energia para o eixo da turbina se processa em duas etapas: primeiramente, o vapor é expandido em bocais visando à conversão da entalpia em energia cinética e, em seguida, o escoamento, em alta velocidade, é direcionado contra as pás dispostas ao longo da periferia de uma roda móvel, entregando para esta, parte de sua energia. (LEMOS, 2015).

De acordo com Pires et al. (2013), sua aplicação maior é em sistemas de cogeração *bottoming* ou em ciclo combinado. O princípio de funcionamento é realizado da seguinte forma: o vapor superaquecido entra na turbina com a energia que precisa para acionar os rotores. Esse vapor pode ser retirado ainda com pressão e temperatura para ser utilizado no processo, ou no estado chamado "exausto", em que está saturado e pronto para entregar seu calor latente, e se tornar líquido no condensador.

As turbinas a vapor contêm seis dispositivos fundamentais que são vistos na figura a seguir, são eles:

FIGURA 01 – PARTES COMPONENTES DA TURBINA A VAPOR



Fonte: NG Metalurgia, 2022.

- a) Estator: Elemento fixo na turbina, que envolve o rotor, responsável pela transformação da energia potencial do vapor em energia cinética por meio dos distribuidores;
- b) Rotor: Roda giratória com pás na sua região periférica, onde as pás adquirem energia cinética proveniente dos bocais de vapor, modificando assim, a sua direção e a velocidade desse vapor;
- c) Expansor: É nele que a energia da pressão do vapor se transforma em energia cinética;
- d) Palhetas: Subdivididas em palhetas móveis e fixas. A primeira são aquelas fixadas no rotor, enquanto a segunda, são aquelas fixadas no estator. As palhetas são responsáveis pela orientação do vapor para a próxima coroa de palhetas móveis;
- e) Carcaça: Suporte das partes estacionárias, tais como: diafragmas e palhetas fixas. Normalmente, são de participação horizontal na grande maioria das turbinas, facilitando a manutenção das turbinas;
- f) Mancais: Responsáveis pelo posicionamento axial do conjunto rotativo em relação às partes estacionárias da máquina e pela manutenção das folgas axiais.

De acordo com LORA E NASCIMENTO (2004), as turbinas podem ser classificadas segundo sua finalidade, sendo para acionamento elétrico ou mecânico, conforme podemos ver no quadro 01 abaixo. A primeira é utilizada para acionar gerador elétrico e normalmente opera com velocidade síncrona (1800 ou 3600 rpm) e com potência entre 16 a 1300 MW. Já a segunda é utilizada para acionar bombas, compressores, ventiladores e outros equipamentos rotativos. Normalmente opera entre 900 e 10000 rpm e com potências entre 500 kW a 10MW.

QUADRO 01 – CLASSIFICAÇÃO DE TURBINAS

| | |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Turbinas de ação ou impulso | O vapor não se expande completamente nos bocais, de forma que continua a sofrer redução de pressão à medida que sua velocidade também diminui devido à alta velocidade com que estas palhetas móveis se movimentam. |
| Turbinas de reação | O funcionamento ocorre devido à queda de pressão do vapor nos bocais, resultando em queda de entalpia e temperatura, e conseqüentemente, aumento da energia cinética do vapor que é transformado em trabalho mecânico |
| Turbina de contrapressão de fluxo direto | Caracterizada pelo vapor na saída da turbina se apresentar a pressão igual ou superior à atmosférica. |
| Turbina de contrapressão com extração controlada | Similar à com sangria, todavia, é utilizada quando o fluxo de vapor de extração é consideravelmente elevado se comparado com o de escape e tem-se variação na demanda no vapor extraído. |

Fonte: Do autor (2022).

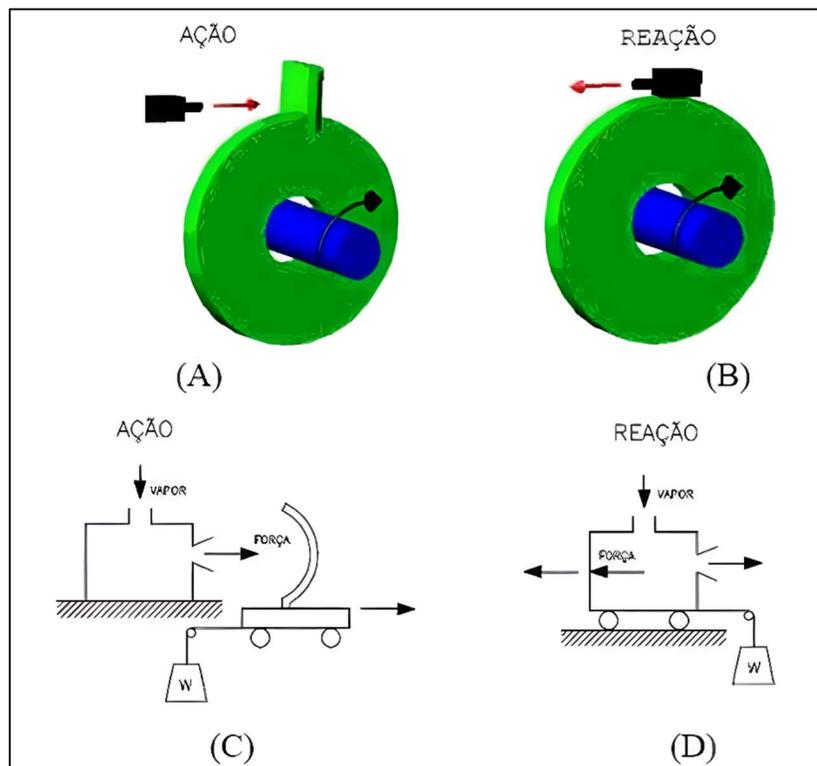
QUADRO 01 – CLASSIFICAÇÃO DE TURBINAS - CONTINUAÇÃO

| | |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Turbina de condensação e fluxo direto | Diferencia-se das anteriores, sendo que o vapor de escape é direcionado para o condensador e se encontra a uma pressão menor que a atmosférica, ou seja, em vácuo. |
| Turbina de condensação com extração | Apresenta condensador onde ocorre o escape do vapor na condição de vácuo, e há a possibilidade de extrair vapor em quantidades variáveis sob pressão constante. |
| Turbina de condensação com reaquecimento | O vapor entrega trabalho no estágio de alta pressão e retorna à caldeira para reaquecimento, retornando posteriormente ao estágio de menor pressão. |
| Turbina com condensador | O vapor sai da turbina e entra em um condensador, no qual condensa-se o vapor, diminuindo sua pressão para ser injetado novamente na caldeira, completando assim o ciclo fechado. |
| Turbina de condensação com uma ou duas extrações controladas | O mesmo funcionamento do sistema das turbinas que possuem somente condensação, porém ocorre a extração de uma determinada vazão de vapor com uma pressão superior à pressão atmosférica. |
| Turbina de contrapressão | Vapor de escape com uma pressão superior à pressão atmosférica; neste caso, o vapor é utilizado em processos industriais. |

Fonte: Do autor (2022).

Resumindo, as turbinas de ação são aquelas em que o vapor tem sua expansão somente ocorrendo nos bocais, enquanto nas turbinas de reação têm parte dos expansores nos bocais e a outra parte nas próprias pás do rotor, conforme está esquematizado na figura 2.

FIGURA 02 – PRINCÍPIOS DE AÇÃO E REAÇÃO DA TURBINA



Fonte: Máquinas Térmicas (UFPR), 2010.

4.2. IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA GERAÇÃO DE VAPOR

Conforme os estudos de DI BERNARDO, L. (1993), a água, além de ser formada pelos elementos hidrogênio e oxigênio na proporção de dois para um, também pode dissolver uma ampla variedade de substâncias, as quais conferem a ela suas características

peculiares. Além disso, as substâncias dissolvidas e as partículas presentes no seio da massa líquida são transportadas pelos cursos d'água, mudando continuamente de posição e estabelecendo um caráter fortemente dinâmico para a questão da qualidade da água. Neste aspecto, é bastante esclarecedora a afirmativa do filósofo grego Heráclito, de que “nunca se cruza o mesmo rio duas vezes”. Esta quer mostrar que na segunda vez não é o mesmo rio que cruzamos, já que as características da água, em maior ou menor grau, serão seguramente distintas. A qualidade requerida está bem definida nas concentrações máximas permitidas para determinadas substâncias, que dispõem sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e superficiais e estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes.

4.3. CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE VAPOR

A capacidade de produção de vapor de uma instalação é expressa frequentemente em quilogramas de vapor por hora (kg/h) e/ou seus múltiplos (kg/s, ton/h). Entretanto para valores distintos de temperatura e pressão, o vapor possui quantidades diferentes de energia, por isso, expressa-se a capacidade de uma caldeira em forma de calor total transmitido por unidade de tempo (kcal/h). Sendo assim:

EQUAÇÃO 1 – CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE VAPOR

$$Q = \dot{m}_v(h_{TOT} - h_L) \quad (\text{kcal/h})$$

Onde:

Q: Capacidade de produção de vapor

\dot{m}_v : Vazão mássica de vapor produzido (kg/h)

h_{TOT} : Entalpia total do vapor (kcal/kg)

h_L : Entalpia da água de alimentação (kcal/kg)

4.4. RENDIMENTO GLOBAL

É definido como a relação entre o calor transmitido e a energia produzida pelo combustível. Além disso, é obtido por meio da Equação 2 abaixo.

EQUAÇÃO 2 – RENDIMENTO GLOBAL

$$\eta_g = \frac{\dot{m}_v(h_{TOT} - h_L)}{\dot{m}_c \cdot PCS} \cdot 100(\%)$$

Onde:

\dot{m}_c : Vazão mássica de combustível queimado (kg/h)

PCS: Poder calorífico superior do combustível (kcal/kg)

4.5. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA USADA NO TRATAMENTO

De acordo com CLEASBY, J. L. (1990), a água é o principal fluido usado em sistemas de geração de vapor. Geralmente os diversos tipos de águas encontrados na natureza nunca são puros, pois todos apresentam certa quantidade de impurezas granulares ou moleculares, cuja composição e proporção estão relacionadas com a constituição geológica dos terrenos atravessados nas proximidades de centros industrializados, além das variações climáticas no decorrer do ano.

A água considerada ideal para alimentação de caldeiras é aquela que não deposita substâncias incrustantes, não corrói os metais da caldeira e seus acessórios e não ocasiona arraste ou espuma. Evidentemente, água com tais características é difícil de se obter, sem antes proceder a um pré-tratamento que permita reduzir as impurezas a um nível compatível, de modo a não prejudicar o funcionamento da caldeira (CLEASBY, J. L., 1990).

Quando não se aplica o tratamento químico interno adequado e eficiente a uma água, esta pode ocasionar uma série de inconvenientes, que resultam em perdas de eficiência, segurança e combustível, as quais são indesejáveis num processo de funcionamento da caldeira (CLEASBY, J. L., 1990).

Com uma manutenção preventiva e com o mínimo de cuidados indispensáveis, pode-se obter o máximo proveito útil de um sistema com os mais baixos custos. Por esse motivo são necessários o controle e tratamento da água utilizada nestes processos (CLEASBY, J. L., 1990).

Os constituintes geralmente encontrados junto com a água são sais dissolvidos inorgânicos e orgânicos, matéria orgânica em suspensão, material coloidal, gases dissolvidos e microrganismos (CLEASBY, J. L., 1990).

As impurezas na água é qualquer substância diferente de H_2O , onde podem ser provenientes de contaminações introduzidas nas linhas ou substâncias inerentes ao material utilizado no armazenamento da água. Impurezas que impactam diretamente no sistema de caldeira são:

- a) Dureza: A dureza de uma água é devido à concentração dos sais de cálcio seja na forma de carbonatos, sulfatos, cloretos e nitratos de cálcio e magnésio, no qual a quantidade de cálcio é duas vezes maior do que a de magnésio (RICHETER, 2009);
- b) Alcalinidade: Exprime a presença de íons dos sais de bicarbonatos, carbonatos, hidróxidos, fosfatos, silicatos e dentre outros que contribuem com o meio alcalino da água. A alcalinidade é diferente de pH, onde o pH é um parâmetro indicativo da quantidade de íons H^+ no meio aquoso, indicando assim, se o fluido é ácido ou alcalino (RICHETER, 2009). O bioquímico Petter Lourutz Sorensen (1930), propôs o uso de uma escala logarítmica para trabalhar com as concentrações dos íons hidrônio [$H_3O_{aquo}^+$] nas soluções que chamou de pH. Se o valor estivesse em 7, o

meio da solução será neutro. Se o pH for menor que 7, o meio será ácido e se for maior que 7 será alcalino ou básico;

- c) Cloreto: São geralmente muito solúveis, sejam eles: cálcio, magnésio, sódio, ferro e outros. Por serem altamente solúveis permitem, em primeira aproximação, estabelecer a porcentagem de descarga de caldeira. Recomenda-se não permitir concentração dos cloretos na água da caldeira 10 a 12 vezes ao cloreto da água de alimentação (RICHTER, 2009);
- d) Ferro: A forma mais comum em que o ferro solúvel é encontrado em águas é como bicarbonato ferroso ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$). Está presente nesta forma em águas subterrâneas profundas - poços, fontes e galerias de infiltração - (RICHTER, 2009);
- e) Magnésio: Cátion mais importante depois do potássio. Uma das principais causas de depósitos em caldeiras e em sistemas de alimentação e trocadores de calor (RICHTER, 2009);
- f) Cálcio: De acordo com (RICHTER, 2009), o cálcio é um metal de baixa dureza, que reage facilmente com o oxigênio na água. Vale mencionar que causa os mesmos problemas mencionados no magnésio;
- g) Gases dissolvidos: Por natureza, a água contém gases dissolvidos. O CO_2 se apresenta com concentrações até 50ppm. O oxigênio é altamente agressivo, atacando o metal da caldeira. O aumento da temperatura da água acentua a agressividade desse gás (RICHTER, 2009);
- h) Sílica: O composto químico mais abundante na crosta terrestre combinado com o oxigênio é a sílica (SiO_2 - dióxido de silício). Já com o oxigênio e outros elementos, forma os chamados silicatos (como por exemplo: de alumínio, magnésio, cálcio, sódio, potássio ou ferro). A designação sílica é utilizada como uma conveniente abreviação para dióxido de silício, seja na forma cristalina, amorfa, e hidratada, ou na forma hidroxilada, também designada como silanol, siloxanol ou silicol (LEHRBUCH DER CHEMIE, 2010).

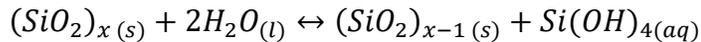
As elevadas concentrações encontradas nas águas subterrâneas em elevadas temperaturas, são responsáveis pelas incrustações mais difíceis de serem removidas das

superfícies metálicas. Sua determinação se faz por processo analítico e analisadores online a fim de garantir a pureza da água na química do ciclo de energia e no monitoramento de água ultrapura.

4.5.1. DISSOLUÇÃO

Tanto a solubilização quanto a deposição da sílica em meio aquoso envolvem as reações de hidratação e desidratação catalisadas por íons OH⁻. A sílica, quando solubilizada, apresenta-se na forma monomérica do ácido silícico Si(OH)₄, conforme representado na Equação 3 (LEHRBUCH DER CHEMIE, 2010).

EQUAÇÃO 3 - REAÇÃO DE SOLUBILIZAÇÃO DA SÍLICA



A sílica existe sob a forma cristalina e amorfa. Na sílica cristalina, os átomos de oxigênio e silício são agrupados dentro de um padrão regular que abrange todo o cristal. Portanto, cada cristal consiste em uma molécula gigante com uma fórmula estequiométrica média, SiO₂. Já a sílica amorfa é o resultado da ação de condições naturais ou artificiais sobre o dióxido de silício, formando sólidos genéricos sem ordenação espacial dos átomos (LEHRBUCH DER CHEMIE, 2010).

4.5.2. CAPACIDADE DE TROCA IÔNICA

Ainda nos estudos de LEHRBUCH DER CHEMIE, a troca iônica é um método de separação bastante utilizado para remoção de metais e íons em processos industriais ou de tratamento de água. Pode ser definida como uma troca reversível de íons entre a fase sólida (trocador iônico) e a fase líquida (solução aquosa). Dessa forma, para um trocador

iônico MA^+ , onde cátions A^+ são os íons trocados em solução aquosa pelos cátions B^+ , a troca iônica pode ser representada pela equação abaixo:

EQUAÇÃO 4 – REAÇÃO DE TROCA IÔNICA



A equação representa uma reação de troca catiônica, onde M^- é o grupo funcional da matriz sólida. Os cátions A^+ e B^+ são chamados contra-íons e os íons presentes em solução tendo a mesma carga da matriz são chamados co-íons. A separação das substâncias acontece devido à diferença de graus de interação das mesmas com o trocador iônico. Tais interações podem ser controladas pela força iônica, pH, etc (LEHRBUCH DER CHEMIE, 2010).

O carvão ativado é considerado um trocador iônico natural sendo esta propriedade enriquecida pela ativação química. A superfície de carvão tem tanto cargas negativas (aniônicas), como cargas positivas (catiônicas) para atrair íons livres em solução ou suspensão. O tratamento de carvão com uma base incrementará a capacidade do carvão para a troca com ânions, e a acidificação das superfícies, dá ao carvão um poder de trocador catiônico. A oxidação da superfície envolve a quimissorção da atmosfera de oxigênio do carvão e uma ampla reação das superfícies oxidadas que reagem quimicamente com outras substâncias que são oxidadas (LEHRBUCH DER CHEMIE, 2010).

4.5.3. QUELAÇÃO

Agentes quelantes são moléculas responsáveis pela formação de um complexo de estrutura cíclica através da sua conjugação por ligações covalentes com íons metálicos (FLORA, S. J. S, 2010).

O avanço dos aspectos sintéticos possibilitou a incorporação de uma variedade de moléculas na estrutura inorgânica polimérica da sílica, contendo diversos centros básicos em suas estruturas, tais modificações estruturais possibilitaram condição de uso destas superfícies como agentes quelantes (FLORA, S. J. S, 2010).

4.6. PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA

O pré-tratamento da água destinada a geração de vapor na caldeira, consiste em processos gerais de desmineralização, destilação, troca iônica ou osmose reversa (BUCKMAN, 1997). Podemos entender melhor cada um destes a seguir:

- a) Coagulação e Flocculação: Nesta etapa, as impurezas presentes na água são agrupadas pela ação do coagulante em partículas maiores (flocos) que possam ser removidos pelo processo de decantação. Os reagentes utilizados são denominados de coagulantes e flocculantes;
- b) Decantação: Os flocos formados no processo anterior se separam da água e pelo fato da densidade começar a formar colchões de flocos no fundo dos decantadores, inicia-se a separação da água por transbordo de forma lenta;
- c) Filtro de areia: Um filtro é constituído de um meio poroso granular, normalmente areia, de uma ou mais camadas, instalado sobre um sistema de drenagem, capaz de reter e remover as impurezas ainda presentes na água;
- d) Abrandamento: Consiste na remoção de cálcio e magnésio da água. Faz uso de resinas que trocam íons sódio (Na^+) ou hidrogênio (H^+). Após saturação do leito, a regeneração é feita com cloreto de sódio ou ácido clorídrico (as vezes sulfúrico);
- e) Osmose Reversa: Permite a purificação da água contaminada pela remoção de materiais dissolvidos e suspensos. Uma membrana é uma barreira que separa a solução de alimentação em duas fases (permeado e concentrado), restringindo, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases (HABERT ET AL, 2006);

- f) Resinas de troca iônica: Utilizadas em indústrias, visando à purificação de águas para a alimentação de caldeiras, obtenção de água pura para química fina, extração de materiais orgânicos e coloides, bem como a extração de metais pesados (POHL, 2006).
- g) Segundo SILVA et al. (2007), quando a troca iônica ocorre, os íons H^+ e OH^- são liberados na água que se encontra em contato com a resina, reagindo entre si como forma de neutralizar a água purificada formando uma nova molécula de água a cada instante;
- h) Desmineralização: Trata-se de um processo completo, removendo os íons positivos e negativos da água e deixando-a praticamente isenta de materiais dissolvidos. Este procedimento é capaz de remover a sílica e silicatos solúveis, além de carbonatos, sulfatos e até cloretos (SILVA et al., 2007).

Os tratamentos citados anteriormente são extremamente importantes na geração de vapor em virtude de prevenir problemas como: incrustação, deposições e erosões nas caldeiras, tubulações e turbinas, pois podem causar perda da eficiência, entupimentos e danos ao sistema. Logo antes a este processo, a água deve passar por um rigoroso tratamento passando por filtros de diferentes configurações como filtro de areia, filtro de carvão e filtros abrandados. Com o principal objetivo de remover sólidos dissolvidos e orgânicos melhorando a eficiência e aumentando o tempo de vida útil de todo o sistema de geração utilizadas (DREW MARINE, 1992).

4.6.1. ARRASTE DE VAPOR DE SÍLICA NA CALDEIRA

É importante salientar que não há água de caldeira 100% pura, tampouco vapor 100% puro. Portanto, é impossível manter um sistema de geração de vapor sem contaminações. Sendo assim, a necessidade de tratamento preventivo constante (ROTHBARTH, 2010).

Nos dias atuais, a cogeração de energia (utilização de vários tipos de energia a partir de uma fonte primária de energia), utiliza caldeiras de alta pressão que vão de 50 até 100 bar de pressão. Isto requer uma qualidade cada vez maior do vapor que será utilizado nas turbinas e este vapor depende da qualidade da água que está na caldeira. Por várias razões, o tratamento químico deve ser utilizado para a água da caldeira, pois a qualidade do vapor e do condensado dependem desta água. Com todos os sistemas de proteção disponíveis e instalados nas caldeiras, sempre haverá um arraste de sólidos do vapor da caldeira para as turbinas, mesmo o vapor superaquecido (ROTHBARTH, 2010).

O arraste de vapor pode ser definido como uma condição na qual a água sai da caldeira junto com o vapor, passando para a seção pós-caldeira, comprometendo a qualidade do vapor e danificando equipamentos e acessórios da rede de distribuição.

O arraste mecânico (gotas de água no vapor) em processos bem ajustados é evitado por diversos tipos de separadores (ciclones e scrubbers). Já o arraste volátil não é possível evitar, visto que os sólidos estão dissolvidos no próprio vapor. Esta solubilidade depende de temperatura e pH da água da caldeira e do vapor saturado e superaquecido. Como foi citado anteriormente, não existe um sistema de geração de vapor 100% isento de impurezas. Sempre haverá a ocorrência de gases dissolvidos e outros elementos químicos, principalmente sódio e sílica (ROTHBARTH, 2010).

FIGURA 03 – CICLONES E SCRUBBERS, SEPARADORES DE GOTÍCULAS



Fonte: Do autor.

Sistemas eficazes de separação de gotículas garantem que o vapor chegue às palhetas da turbina com 0,1% de umidade. O problema maior está na água da caldeira, que permite alguns sólidos se dissolverem no vapor e são arrastados (o termo volátil está implícito neste arraste através do vapor). A sílica e o sódio são os mais importantes, pois provocam danos maiores aos sistemas pós-caldeira (ROTHBARTH, 2010)

Dentre as formas de arraste, temos:

- a) Arraste mecânico: Flutuação de carga, nível de operação alto e falhas no separador de gotículas;
- b) Arraste químico: Presença de matéria orgânica = óleos e aumento brusco dos sólidos;
- c) Arraste volátil: Volatilização de sólidos, em geral sílica, em altas temperaturas e altas pressões.

O vapor que deixa o balão da caldeira pode provocar erosão, corrosão e depósito (incrustação) nas palhetas das turbinas. Para garantir os parâmetros do vapor dentro da especificação técnica, a qualidade da água desmineralizada deverá ser de acordo com os dados contidos no quadro abaixo:

QUADRO 02 – PARÂMETROS DE ESPECIFICAÇÃO DA ÁGUA DESMINERALIZADA

| Parâmetros | Unidade | Especificação |
|------------------------------|---------|---------------|
| Condutividade Específica (a) | μS/cm | < 0,1 |
| Condutividade Específica (b) | μS/cm | < 0,5 |
| Sódio (Na) | ppb | < 10 |
| Sílica (SiO ₂) | ppb | < 20 |
| Ferro (Fe) | ppb | < 20 |
| Cobre (Cu) | ppb | < 3 |
| Carbono Orgânico Total (TOC) | ppb | < 300 |

Fonte: Do autor.

Segundo ARNO ROTHBARTH, 2010, o vapor, como sabemos, é a água no estado gasoso. Esta mudança de estado é proporcionada pelo efeito direto do calor e inverso da pressão. Em outras palavras: ao fornecermos calor para a água, ela tem sua temperatura elevada até um certo limite e, a partir daí, começa a passar para a fase gasosa. Para que isto ocorra, as moléculas de água no líquido têm que vencer a força que a pressão exerce sobre elas, ou seja, quanto maior a pressão, mais força as moléculas necessitam fazer. Esta energia é fornecida justamente pelo aquecimento e resulta no aumento da temperatura de vaporização do líquido. Quanto maior for a pressão, mais energia o vapor transportará pelas moléculas de água que o constitui. Ao se condensar, a mesma energia que as moléculas absorveram para passar para fase vapor é liberada para o meio, resultando aí na transferência de energia na forma de calor. Existem basicamente dois tipos de vapor:

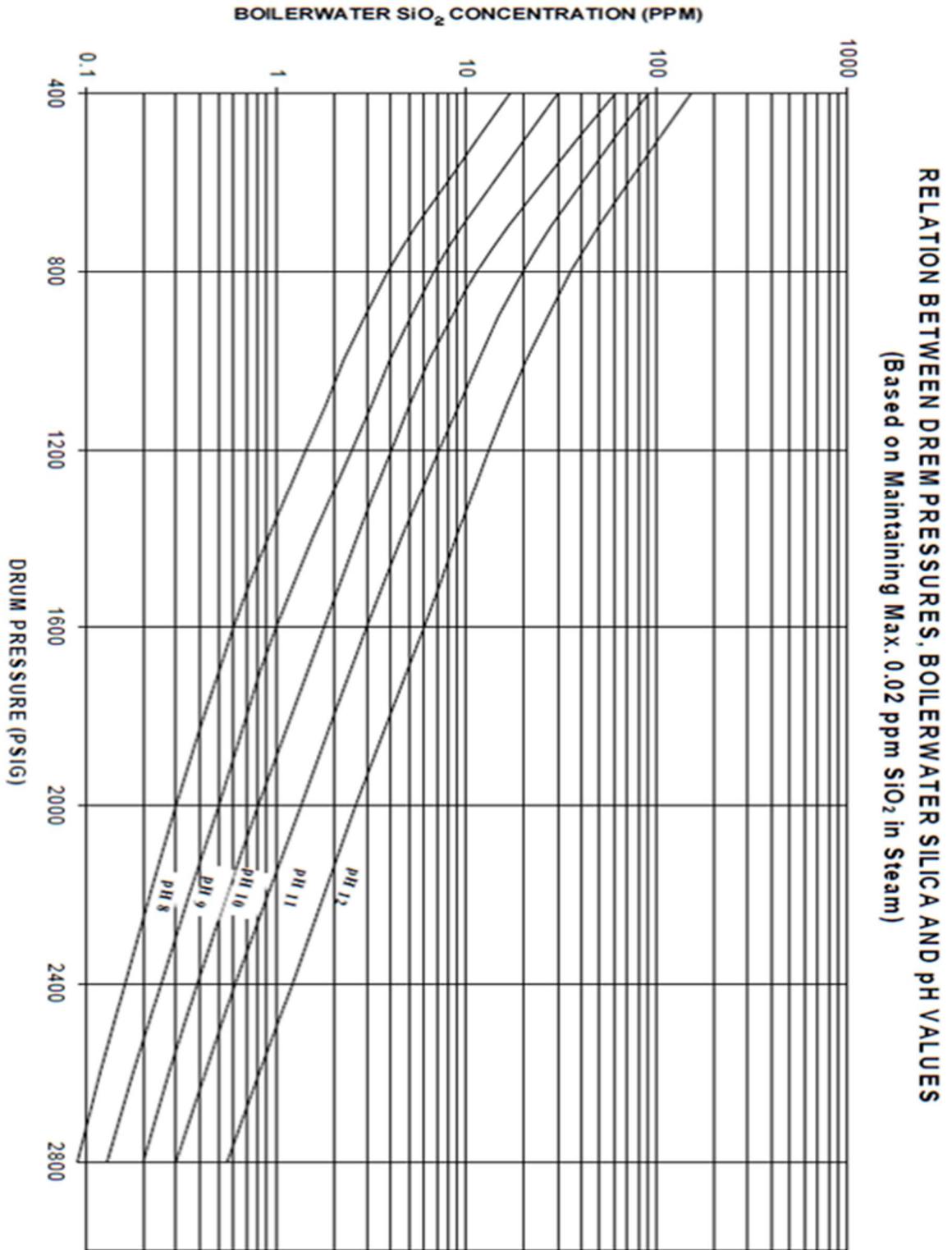
- a) Vapor saturado: É um vapor “úmido”, contendo pequenas gotículas de água, sendo obtido por meio da vaporização direta dela. Quando este tipo de vapor se condensa, cede calor latente. É usado para aquecimento direto ou indireto;
- b) Vapor superaquecido: É obtido através do aquecimento conveniente do vapor saturado, resultando em um vapor seco. É usado para transferência de energia cinética, ou seja, para geração de trabalho mecânico (turbinas).

A necessidade do uso de vapor superaquecido em turbinas é decorrente das elevadas velocidades que são encontradas nestes dispositivos. Caso fosse usado o vapor saturado, qualquer gotícula de água que se formaria na tubulação provocaria um forte processo de abrasão na turbina (ARNO ROTHBARTH, 2010).

É muito comum a ocorrência de arraste de gotículas de água no vapor em caldeiras pequenas e de baixa pressão. Geralmente nestes casos, não há geração de energia elétrica através de uma turbina, mas os efeitos nocivos aos sistemas pós-caldeira irão ocorrer, tais como corrosão, incrustação, erosão, etc (ARNO ROTHBARTH, 2010).

O gráfico abaixo mostra a relação entre a sílica dissolvida na água da caldeira e no vapor, em diferentes pressões. Segundo a literatura especializada, teores de sílica abaixo de 0,02 ppm ou 20 ppb no vapor, garantem um excelente condicionamento do sistema.

GRÁFICO 01 – RELAÇÃO SÍLICA X PRESSÃO EM CONDIÇÕES DE PH, TAPPI

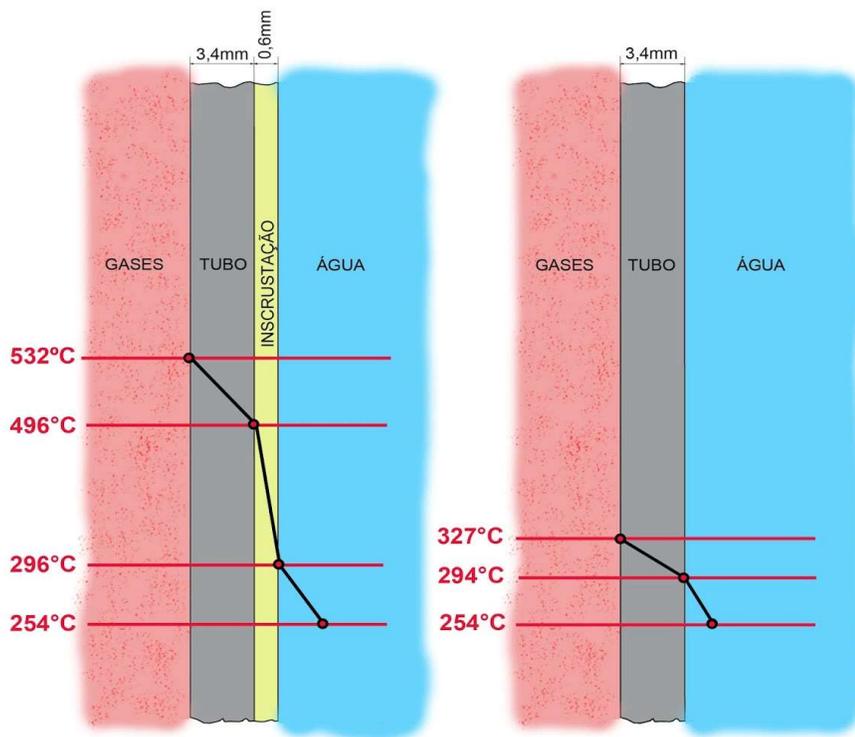


Fonte: TAPPI, Klein, H. A, 1962.

Nível de sílica na água da caldeira é geralmente mantido abaixo das diretrizes estabelecidas. No entanto, a sílica coloidal (não reativa), presente em alguns suprimentos de reposição de água, pode passar pelo ânion das resinas aniônicas na desmineralização, contaminar a água de alimentação e, posteriormente, a água da caldeira.

As incrustações e deposições de sílica ocorre quando o vapor esfria e a medida que se move pela turbina. A essas temperaturas mais baixas, a sílica precipita sobre as pás da turbina, onde se acumula como um depósito vítreo. Sua remoção requer tratamento químico. Na figura 4 é possível perceber os impactos da sílica na eficiência de troca térmica;

FIGURA 04 – IMPACTOS DA SILICA NO SISTEMA



**ELEVAÇÃO DAS TEMPERATURAS NO LADO DOS GASES
EM RAZÃO DA PRESENÇA DAS INCRUSTAÇÕES.**

Fonte: CALDEIRAS / 2004 por Prof. José Luiz Gyurkovits.

As principais consequências do arraste podem ser melhor visualizadas abaixo:

- a) Em condições de caldeira, a sílica coloidal é rapidamente convertida em sílica reativa, e potencialmente, forma depósitos nas tubulações. Sílica coloidal é particularmente problemático em águas superficiais após períodos de escoamento intenso como resultado de chuvas;
- b) Como a volatilidade da sílica aumenta com a temperatura, altas concentrações de sílica na água de caldeira de alta pressão podem resultar em depósitos de turbina que podem reduzir a saída dos bocais com a deposição e a eficiência da turbina;
- c) Corrosão: É um ataque químico que causa perda de metal na lâmina da turbina. A maioria das pás da turbina é de aço. Mesmo os aços de alta qualidade oxidam parcialmente às temperaturas da turbina e reagem com a sílica. Se não tratada, essa corrosão romperá a turbina;
- d) Redução de capacidade: Depósitos de sílica nas pás e outros elementos da turbina restringem o fluxo de vapor da caldeira para ela. Isso resulta em uma perda de produção da turbina e uma redução na capacidade de geração de eletricidade da turbina;
- e) Diminuição da pressão: À medida que os depósitos de sílica se acumulam nas pás da turbina, eles causam uma queda de pressão dentro da própria turbina. Os depósitos são de espessura aleatória e causam problemas de equilíbrio e vibração dentro da turbina.

Os fabricantes de turbinas continuam a reduzir o nível máximo de sílica permitido no vapor. Consultam com o fabricante da turbina e determinam a concentração máxima permitida de sílica na água de caldeira.

5. ESTUDO DE CASO

5.1. NECESSIDADES ENERGÉTICAS DA EMPRESA

A empresa em estudo apresenta demanda de energia para produção de celulose, utilizando energia elétrica e energia térmica no processo de geração de vapor e processo geral da fábrica, gerando cerca de 35MW/h por turbina totalizando 5 turbinas no processo, gerando em um total de 155MW/h.

A caldeira produz vapor superaquecido de alta pressão (64 bar abs e 455°C), utilizando como combustível principal casca de eucalipto e resíduos de madeira e recuperação de químicos.

À medida que o vapor cede energia para o acionamento da turbina, este vai perdendo pressão e temperatura e vai passando da condição de superaquecido para a condição de saturado. Vapor saturado é aquele que podemos visualizar, como uma fumaça branca, tal qual as nuvens (BOILER COMPANY, 2015).

As capacidades de projeto de geração de vapor com água de alimentação a temperatura de 127°C são:

- a) 180 t/h com queima de biomassa;
- b) 170 t/h com queima de óleo combustível;
- c) 80 t/h com queima mista.

Em média, dependendo do projeto da turbina, a cada 8 toneladas de vapor gera 1 MW de energia elétrica. No processo descrito, parte do vapor gerado pela caldeira vai para o processo industrial, por extração na pressão e temperatura desejada e parte do vapor é transformado em energia elétrica necessária para consumo dos equipamentos do sistema da fábrica, prédios, salas de controle e sistemas externos de automação.

5.2. VENTILADOR DE TIRAGEM INDUZIDA

A caldeira é equipada com um ventilador de tiragem induzida do tipo centrífugo. O ventilador é feito de chapa de aço carbono e projetado para acionamento direto por uma turbina a vapor.

Rotor, mancal e a turbina são colocados sobre uma base comum feita de chapa de aço. A base é montada sobre um quadro moldado na fundação de concreto. Um conjunto de calços absorvedores de vibrações é colocado sob a fundação de concreto.

O ventilador de tiragem induzida é acionado por uma turbina a vapor consumindo vapor superaquecido a 6,3 Mpa/435 °C, proveniente da caldeira.

A turbina é do tipo GFSD. Ela é uma turbina de simples estágio, do tipo reação e fornecida com redutor. O rotor da turbina é equipado com dois anéis de palhetas. A carcaça de turbina e do redutor, bem como do reservatório de óleo, formam uma unidade integrada. O resfriador tubular de óleo está disposto lateralmente ao reservatório de óleo.

Os principais dados técnicos da turbina são:

| | | |
|-------------------------------|-----|------|
| a) Potência máxima | kW | 1000 |
| b) Consumo de vapor | t/h | 10,8 |
| c) Pressão do vapor vivo | MPa | 6,0 |
| d) Temperatura do vapor vivo | °C | 455 |
| e) Pressão do vapor de escape | KPa | 350 |
| f) Velocidade da turbina | rpm | 7500 |
| g) Velocidade inicial | rpm | 845 |

Os ciclos térmicos teóricos são utilizados como parâmetros de comparação da eficiência da turbina Cotton (1998).

Cotton (1998), aponta que o cálculo de rendimento a partir da medição de entropia do fluido é a forma mais rápida e com melhor custo-benefício de avaliar uma turbina. Como regra geral, ele relaciona que a cada 1% de redução de pressão resulta na redução de 0,1% de energia gerada pela turbina.

Na turbina, a pressão do vapor vivo é reduzida gradativamente até o nível da pressão de vapor de escape. A turbina pode ser colocada em perigo devido ao fato de se ultrapassar os valores limites, máximos ou mínimos, permitidos para a pressão do vapor vivo, do estágio de extração, do condensador ou da vedação do eixo. Por este motivo, as principais pressões de operação da turbina precisam ser monitoradas constantemente com os manômetros existentes.

Quando um valor-limite é atingido, a operação deve intervir imediatamente e eliminar a causa.

Em caso de alteração do comportamento da pressão na turbina, isto geralmente causa uma alteração do cisalhamento axial e, portanto, também da carga sobre o mancal axial.

O comportamento da pressão é perturbado através de:

- a) Sujeira no conjunto de palhetas, por exemplo, devido à salinização ou silicificação;
- b) Danos no conjunto de palhetas, que levam a alterações na seção transversal;
- c) Alterações dos fluxos de vapor em cada estágio, por exemplo, alteração dos fluxos de extração e de tomada, além de desvios do dimensionamento.

Para o monitoramento, deve-se dispor do diagrama de pressão prescrito para os estágios, enquanto passível de medição, para diferentes fluxos de vapor. As diferenças em relação ao prescrito podem levar a conclusões sobre as falhas acima citadas.

As válvulas de segurança do gerador de vapor, ou da rede de vapor, protegem contra uma pressão de vapor vivo muito alta, ao eliminar o vapor excedente, tão logo a pressão permitida seja ultrapassada.

Em caso de salinização acentuada ou quando a turbina apresenta uma capacidade de absorção significativamente maior que o fluxo de vapor na potência nominal, a pressão no compartimento da roda pode aumentar tanto que a carcaça e o conjunto de palhetas ficam em perigo. Ao mesmo tempo pode ocorrer um cisalhamento axial acima do valor permitido. Quando os valores-limite são ultrapassados, o fluxo de vapor na turbina deve ser limitado a um nível em que os valores normais sejam novamente atingidos.

5.3. SIMULADOR - TURBINA

As fábricas que utilizam caldeira com capacidade de geração de vapor, que vai de uma tonelada de vapor por hora até 500 toneladas de vapor por hora, ou seja, no período de uma hora a caldeira, têm a capacidade de transformar 500.0000 litros de água do estado líquido para o estado de vapor, com capacidade de gerar cerca de 60MW/h de energia elétrica (BERMO, 2021).

Na turbina de contrapressão, uma parcela desse vapor passa pelas paletas gerando energia para alimentação de toda a fábrica. Outra parcela é extraída como vapor de média e vapor de baixa, alimentando processos industriais, trocadores de calor, aquecimento, cozimento, etc. Parte desse vapor se torna condensado perdendo temperatura e pressão, retornando como para a caldeira.

Na turbina de condensação, o vapor que entra na máquina, tem sua pressão e temperatura rebaixados, ou seja, há uma queda entálpica, e dessa queda entálpica e da respectiva expansão do vapor, extrai-se a energia que movimenta o eixo rotor. Quanto maior a diferença entre a entalpia do vapor que entra e a entalpia do vapor que sai da

turbina, maior a energia aproveitada. Todavia na maioria dos casos, quando esta queda entálpica não é tão grande, a eficiência global do ciclo pode ser comprometida, sendo assim, não se aproveita toda a energia do vapor que poderia ser aproveitada (BLOG WORTICE, 2020).

Como visto no conteúdo deste trabalho, a sílica é um item altamente incrustante, preocupante para todas as classes de caldeiras. O impacto da sílica no tratamento de água de caldeiras não é o mesmo entre caldeiras de baixa e alta pressão. Logo, os limites de controle máximo recomendado é variável e diminui conforme a pressão da caldeira aumenta (INDUSTRIAL WATER BRASIL).

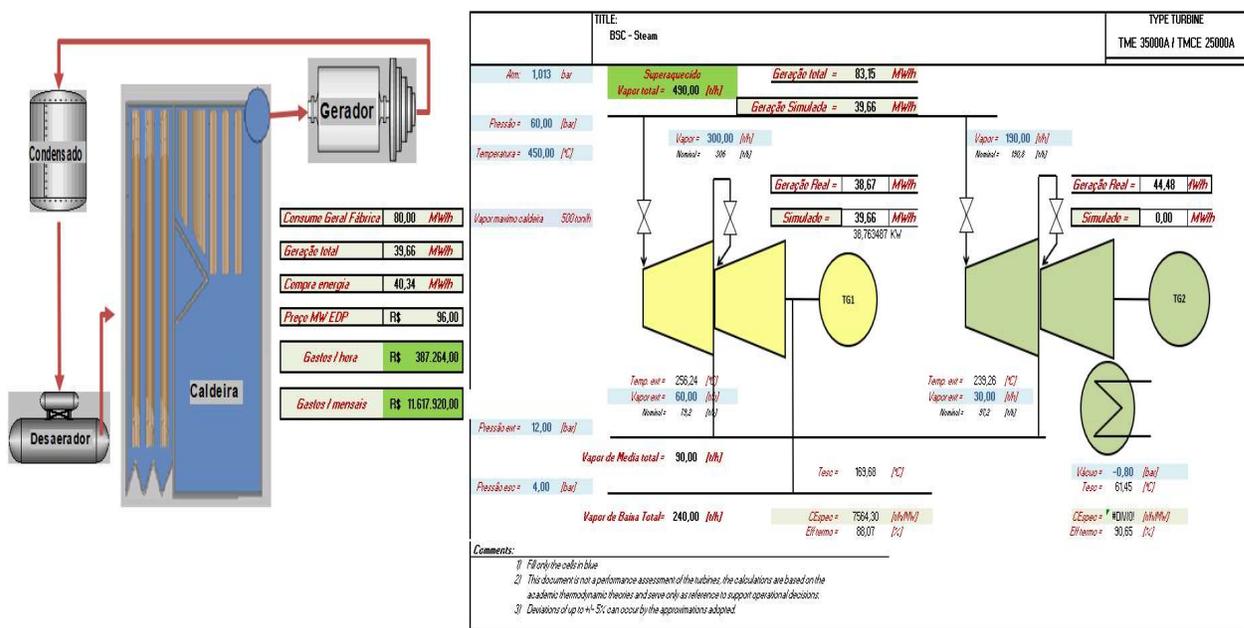
Na figura abaixo é possível simular uma demanda de compra de energia no período de 30 dias gerando um custo de aproximadamente 13 milhões de reais devido à uma parada emergencial de uma turbina, impactando diretamente na receita da companhia.

FIGURA 04 – CUSTOS DE GERAÇÃO

Fonte: Do autor, 2022.

No simulado, que será apresentado abaixo, é possível avaliar esta queda do rendimento e o prejuízo estimado em caso de redução e ou perda total da turbina.

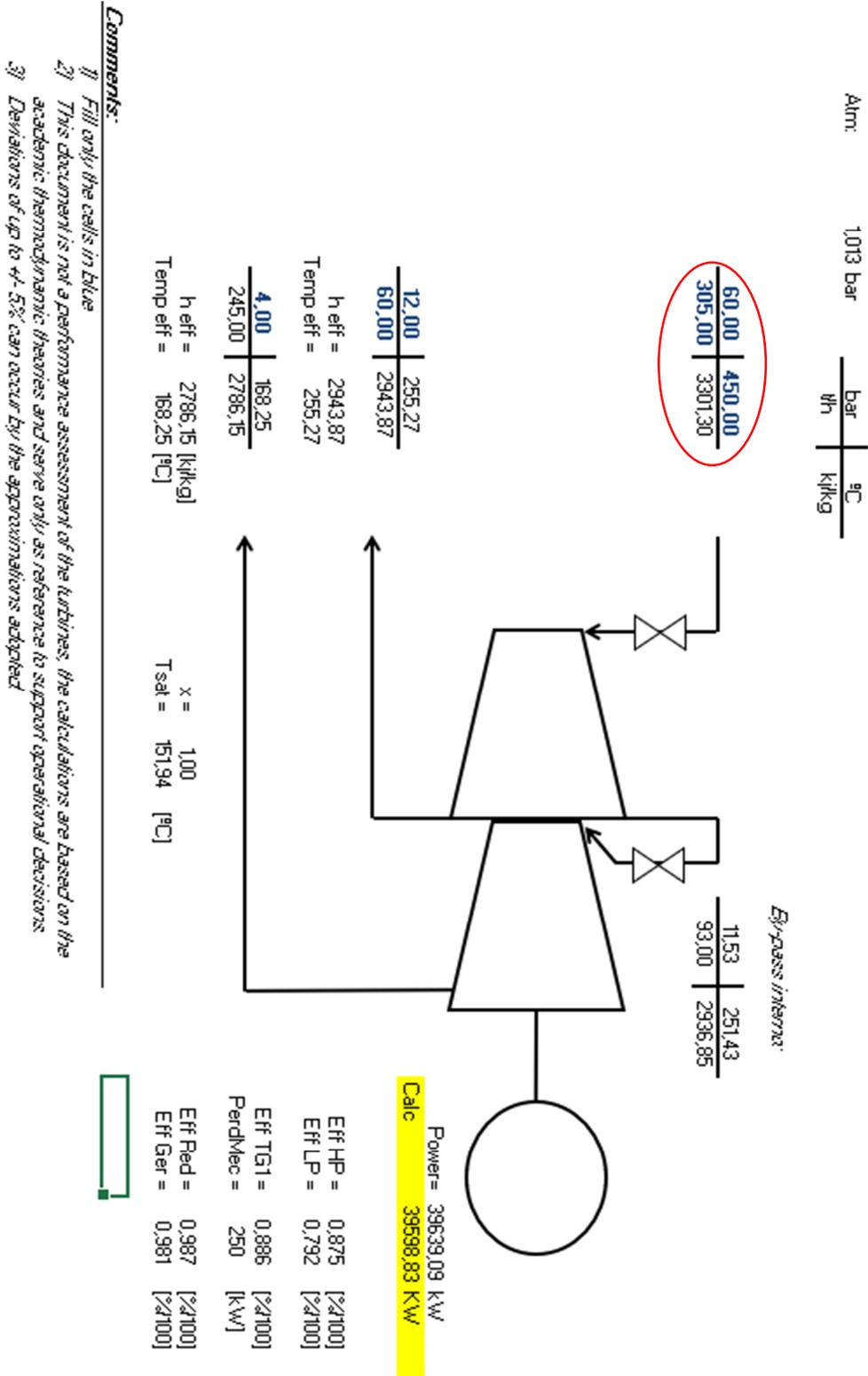
FIGURA 06 – SIMULADOR DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR TURBINA



Fonte: Do autor, 2022.

Na seção de fluxo com baixa pressão, a selagem de vapor é feita entre a pressão atmosférica e a baixa pressão da seção. Os selos da seção de baixa pressão evitam a entrada de ar, já que a seção de fluxo se encontra a uma pressão menor do que a atmosférica. O cálculo destas vazões é realizado durante o cálculo de balanço de massa e energia do ciclo térmico (DRBAL, et al. 2000).

FIGURA 07 – METODOLOGIA DE CÁLCULO



Fonte Do autor.

O monitoramento do sistema avaliando o desempenho e eficiência deve ser a tomada de decisão correta para uma manutenção programada da turbina devido aos vários problemas de degradação interna dos turbogeradores, já que com o monitoramento é possível detectá-los.

QUADRO 03 – DEGRADAÇÕES E FORMA DE DETECÇÃO.

| Parte Afetada | Forma de Degradação | Comentários e Condição de Monitoramento Adequado |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Palhetas | Erosão por partículas sólidas (erosão também por gotículas de água nos últimos estágios de baixa pressão) | Usualmente ocorre de forma gradual, sendo à parte mais danificada as pás de entrada do estágio. É menos usual em grupos com admissão de vapor em condições subcríticas. É detectado pela análise de desempenho. |
| Palhetas | Pás danificadas, quebradas ou ausentes. | Geralmente é inesperado. A análise de vibração e de desempenho podem detectar este problema. |
| Rolamentos e Mancais | Danos por erosão (partículas metálicas) do metal patente. | A análise de desempenho e a análise de vibração detectam o problema. A presença de partículas metálicas no óleo de lubrificação colhido nas amostras para análise em cada rolamento ou mancal é de valor representativo, mas de alto custo senão impraticável. |
| Rotor | Desbalanceamento temporário, rachaduras, trincas, desalinhamento e fricção. | A análise de vibração detecta este problema. |
| Válvulas, eixo, juntas, vazamentos internos. | Vazamentos devido à flambagem do eixo desgaste e quebra da selagem. | Geralmente ocorrem de forma gradual, mas podem ser repentinos. A análise de desempenho detecta o efeito de desgaste no sistema de selagem principalmente nas seções de alta pressão. |
| Filtros, pás e válvulas. | Incrustações | Normalmente ocorrem de forma gradativa, na maioria das vezes em áreas com temperatura em torno de 260°C. |
| Condensador | Vazamentos de vapor, entrada de ar e entupimento dos tubos. | Análise de desempenho para condensadores. |
| Válvulas de Alta, Média e Baixa Pressão, By-pass, etc. | Vazamentos. | Análise de desempenho. A detecção por ruído (detecção acústica) também é possível. |

Fonte: BEEBE (2003).

Quatro principais problemas podem ser esperados no que se refere a danos em turbinas a vapor, são eles:

- a) Vazamentos excessivos de vapor (danos por desgaste e atrito no sistema de selagem);
- b) Erosão por partículas sólidas;
- c) Danos internos;
- d) Incrustações.

5.4. MAJOR OVERHAUL

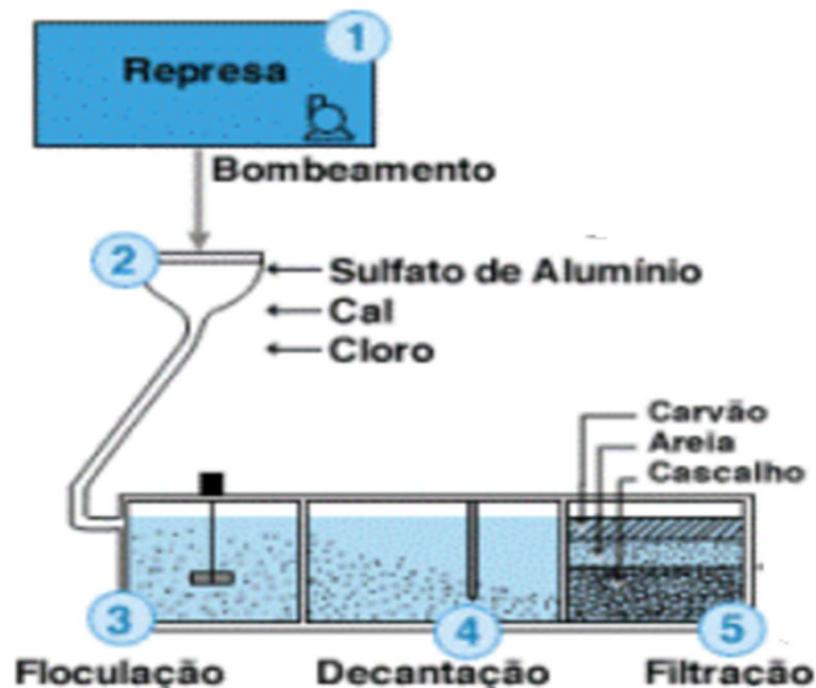
Um *Major Overhaul* é realizado durante uma parada geral de fábrica e do turbo gerador, permitindo assim, uma verificação completa de todo o circuito de caldeira e turbogeradores, uma inspeção de averiguação de todos os componentes, inspeção de incrustação e deposição e ainda a substituição dos itens normais de desgaste. Para isto, o equipamento é totalmente aberto. As rotinas de manutenção para turbinas a vapor possuem atividades diariamente 24 horas por dia de acompanhamento operacional. As grandes revisões são executadas normalmente a cada 50000 horas/equivalentes de operação.

A duração da parada para um Major Overhaul varia de acordo com a avaliação prévia do equipamento, o projeto do turbo gerador, o escopo do trabalho e o número de pessoas envolvidas na atividade. É comum se encontrar prazos entre 20 e 30 dias de manutenção. Este tipo de revisão busca identificar e corrigir possíveis mecanismos de falha mecânica (fluência, erosão, corrosão, fadiga, fadiga térmica) a fim de detectar danos, aumentar a longevidade do equipamento e evitar acidentes catastrófico (BAZZO).

Em caldeiras de geração de vapor, o sistema de tratamento desta água é constituído basicamente pela etapa de captação, tratamento no processo de aglutinação, floculação e decantação para a remoção dos sólidos suspenso, impurezas e contaminantes presentes nela, tratamento por filtro de área e carvão, tratamento de osmose e leito misto e pré-aquecimento.

Abaixo apresentaremos um fluxograma que demonstra o processo inicial do pré-tratamento da água bruta antes de ser bombeada para o processo da caldeira.

FIGURA 08 – FLUXOGRAMA DO PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA

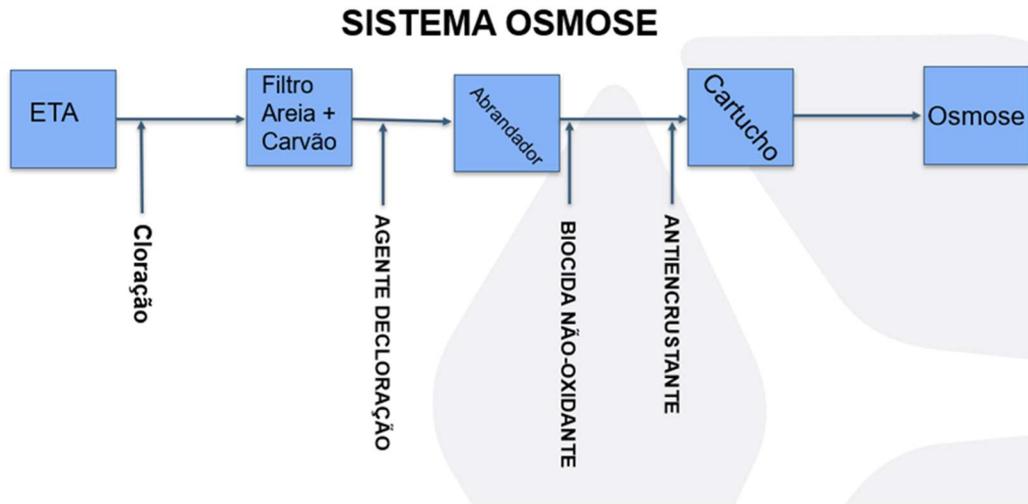


Fonte: Esquadrão do Conhecimento (2022).

Após o pré-tratamento, como explicado no conteúdo deste trabalho, a água segue para a remoção das partículas ainda presentes. Seguindo ainda por recomendações do pré-tratamento na qualidade da água para preservação dos filtros e membranas nos sistemas de osmose reversa, ela passa por filtros de areia que em sequência passa pelos filtros

de carvão, abrandadores, filtros cartuchos com elemento filtrante de 3 micras e finalmente nos bancos de osmose reversa.

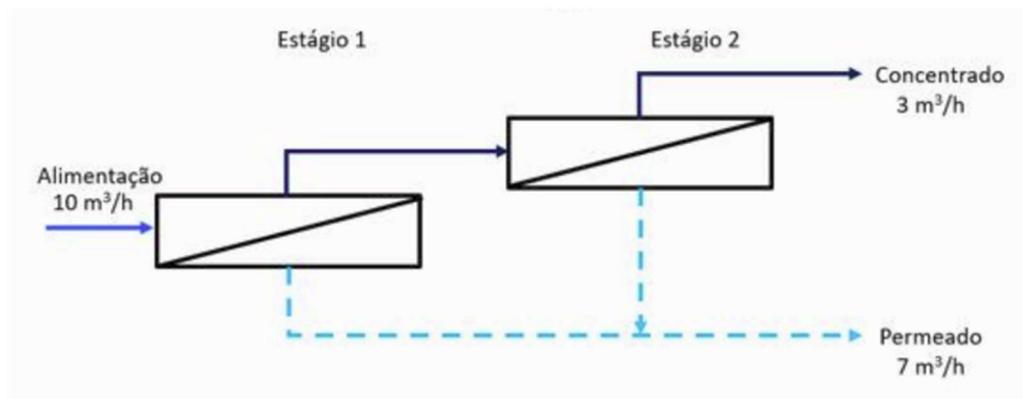
FIGURA 09 - FLUXOGRAMA OSMOSE REVERSA.



Fonte: Do autor.

No processo de osmose, já no primeiro estágio, 100% da água que passa pelas membranas osmóticas limitam-se a recuperar 50% dela e permeando então 50% de rejeito, logo, este rejeito passa por outras membranas, o que se denomina como segundo estágio, logo, esses 50% de entrada de rejeito, 25% se torna permeado e 25% é rejeito.

FIGURA 10 - CONFIGURAÇÃO DA OSMOSE REVERSA.



Fonte: Joaquim Marques Filho (2022).

Fábricas com maior capacidade de investimento conseguem ter mais de 2 estágios de osmose para aproveitar ao máximo esta água de rejeito, o que minimiza muito as perdas líquidas do processo. Por fim, esta água permeada segue para um tanque de resina catiônica e aniônica conhecido como leito misto.

O processo de desmineralização por troca iônica é um processo químico, no qual os íons das resinas são substituídos pelos íons de maior valência presente no líquido a ser tratado. Este processo é dividido, basicamente, em dois passos envolvendo resinas catiônicas e aniônicas.

No caso do leito misto, as duas resinas estão misturadas em um mesmo vaso e é utilizado normalmente como polimento após uma etapa anterior de desmineralização. Quando ocorrer a saturação das resinas é necessário se realizar a regeneração delas. Este processo ocorre dentro da própria coluna. Para a resina catiônica utiliza-se dosagem de um ácido e para a resina aniônica, a dosagem de hidróxido de sódio. O efluente gerado pela regeneração precisa ter seu pH neutralizado antes de ser descartado.

5.5. DESVIOS NO CONTROLE DE CONTAMINANTES

Para este estudo de caso, o sistema de monitoramento e método de análise dos vasos de resinas catiônicas e aniônicas do sistema do leito misto tem se tornado um grande vilão para o controle adequado dos níveis aceitáveis dos contaminantes presentes na água.

Sabe-se que mesmo com toda robustez de tratamento da água, alguns sólidos contaminantes estão presentes em meio ao fluido que necessita ser removido para garantir uma ótima qualidade para a geração de vapor, preservando além da caldeira, os componentes internos das turbinas, conforme explicado dentro do trabalho.

Essas resinas com um certo período de campanha começam a perder a eficiência de capturar os íons positivos e negativos que são os contaminantes dissolvidos na água. Caso ocorra uma falha no monitoramento do período de saturação, os íons de ligação mais fraca se desprendem, logo, estes contaminantes irão diretamente para a caldeira de vapor e, em sequência, irão volatilizar e parar nos componentes principais das turbinas, impactando diretamente na eficiência de produção de energia de consumo da fábrica e processo podendo ainda ocasionar paradas emergenciais por altos teores de contaminantes.

Ainda deve se saber que contaminações como a de sílica são muito prejudiciais para as paletas, pois afetam sua estabilidade aumentando as vibrações e dependendo da pressão e concentração do contaminante, podem ocorrer erosões drásticas nas paletas.

Exatamente neste estudo de caso, o erro principal desta falha foi o de monitoramento do período de regeneração dos leitos mistos de resinas impactando nos resultados encontrados pelo laboratório central. Resultados muito elevados de sílica foram encontrados na água desmineralizada, água de alimentação, condensado balão de vapor e vapor superaquecido.

Diariamente, em cada turno, analistas laboratoriais realizam análise da água da caldeira e processo a fim de analisar suas condições reais e avaliar se os equipamentos online instalados em área estão de acordo com o resultado encontrado. Estas análises de controle se fazem necessário para garantir a qualidade do vapor, geração de energia e a preservação de todos os equipamentos do processo.

Nesta rotina de análise é verificado a condutividade, pH, dureza, ferro, cálcio, cobre, sílica e entre outros. Nesta análise de laboratório é utilizado equipamentos de última geração com por equipamento espectrofotômetro HACH.

FIGURA 11 - ESPECTROFOTÔMETRO POURTHRU



Fonte: Loja Net Lab. (2022).

Como mencionado no contexto deste trabalho, para a geração de vapor existe limites aceitáveis de controle desses contaminantes. Para a sílica na alimentação e vapor, os limites são de 20 ppb, enquanto que a caldeira, que tem ciclo de concentração, segue com limite de 2 ppm para controle.

Resultados encontrados de sílica indicaram valores acima da recomendação na alimentação com 200 ppb, na água desmineralizada com 308 ppb e no vapor superaquecido com 54 ppb. Já para o resultado de água de caldeira valores em 10,930 ppm.

Valores analisados que esteja fora da faixa de controle, como neste caso da sílica, devem seguir com procedimentos de contingência para a preservação das caldeiras e turbos geradores.

5.6. PROCEDIMENTO DE CONTINGÊNCIA SILICA – TAPPI

De acordo com a TAPPI, a sílica pode formar depósitos problemáticos em caldeiras, turbinas e estações de superaquecimento. Os depósitos de sílica são difíceis de remover, o que torna o controle do depósito de sílica extremamente importante para a operação do painel de controle da fábrica.

Uma das principais fontes de preocupação é a deposição de sílica em turbina. A sílica da água de caldeira exibe uma volatilidade significativa em pressões de operação de 600 psi acima. O grau de volatilidade é uma função da pressão da caldeira e do pH da água da caldeira. A sílica que é vaporizada na caldeira passa pelo superaquecedor e entra na turbina como um gás. O vapor esfria à medida que se expande pela turbina e a sílica se solidifica. Quando a concentração de vapores de sílica no vapor é muito alta, à proporção que a sílica se solidifica, formam-se depósitos nas pás da turbina. Os depósitos de sílica formados neste pode reduzir tanto a capacidade quanto a eficiência da turbina.

5.7. FONTE DE CONTAMINAÇÃO

Seguindo ainda as informações da TAPPI, fontes potenciais de alto teor de sílica, a sílica solúvel pode entrar na água da caldeira em qualquer ou em todas as correntes que compõem a água de alimentação da caldeira e reposição. Algumas das fontes mais comuns de contaminação por sílica são:

- a) Água Desmineralizada: A água desmineralizada fica contaminada com sílica sempre que o ânion de base forte e as unidades são operadas além de seu ponto de ruptura ou quando o vazamento de sílica aumenta durante o ciclo de serviço.

Esses problemas geralmente ocorrem quando o nível de sílica da água bruta aumenta, a unidade de cátions quebra o sódio na troca iônica, o desempenho da resina diminui devido à incrustação ou degradação, ou os procedimentos de regeneração não são adequadamente seguidos;

- b) Contaminação da água: Vazamentos nas vedações da bomba geralmente contaminam o condensado e a água de alimentação da caldeira com a bomba de água. Quando isso ocorre, além da sílica, a água de alimentação fica contaminada com todos os sólidos, como cálcio e magnésio, presentes na água de selagem da bomba;
- c) Contaminação da água de temperatura: A água de temperatura é injetada diretamente na água superaquecida (vapor), altas concentrações de sílica na água de temperatura causarão altas concentrações de sílica no vapor;
- d) Sílica coloidal [analiticamente não reativa]: Pode entrar na caldeira através do sistema de água de reposição. A sílica é um problema especial, pois geralmente não é detectada até que se dissolva na caldeira quente e alcalina.

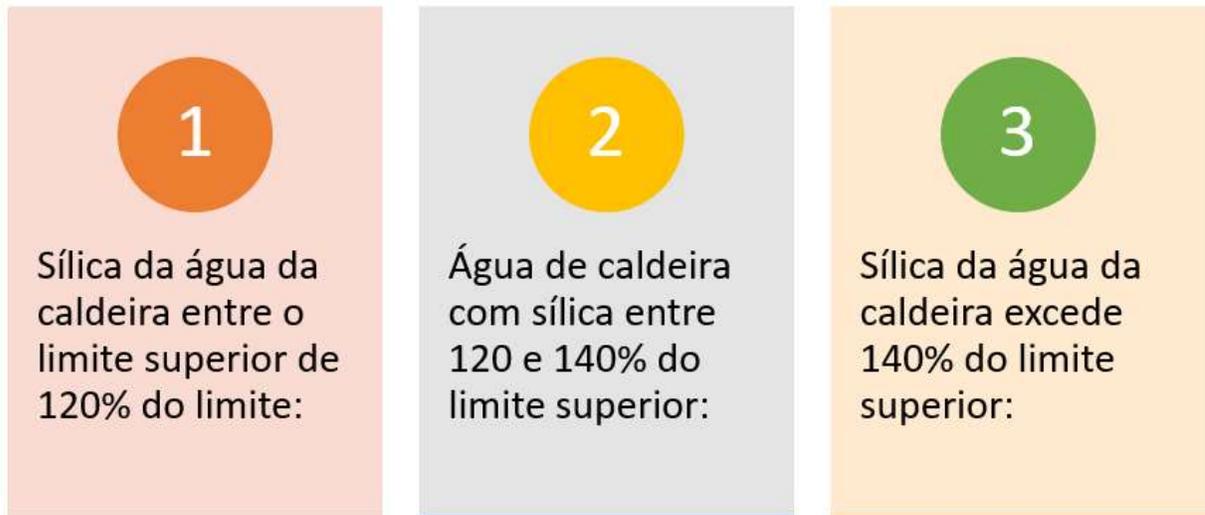
Os fluxos de amostragem para análise de sílica, incluindo vapor, condensado e água desmineralizada, devem fluir em uma vazão contínua.

Ao iniciar um ponto de amostragem, ele deve ser lavado por no mínimo uma semana antes da coleta de amostras para análise.

5.8. PLANO DE CONTINGÊNCIA

Os Planos de Contingência para responder a altos níveis sílica de água de alta caldeira serão apresentadas abaixo.

FIGURA 12 – PLANO DE CONTINGÊNCIA



Fonte: Do autor. (2022).

Sílica da água da caldeira entre o limite superior de 120% do limite:

- a) Aumente a purga da caldeira para reduzir a sílica;
- b) Iniciar uma busca agressiva pela fonte do contaminante, incluindo testes de vazamento de ânion de base forte e ruptura e contaminação por condensado. Quando a fonte de contaminação for encontrada, elimine-a;
- c) Colete amostras de vapor e monitore a presença de sílica. Se os níveis de sílica excederem as especificações do fabricante das turbinas, considere reduzir a pressão da caldeira para que a sílica da água da caldeira não exceda o nível máximo recomendado para essa pressão;
- d) Recolher amostras de água temperada. Se a sílica da água temperada exceder o nível máximo recomendado no vapor, considere interromper o uso de água temperada. Importante ficar atento que isso pode exigir a redução da carga da caldeira para evitar temperaturas excessivas do vapor.

Água de caldeira com sílica entre 120 e 140% do limite superior:

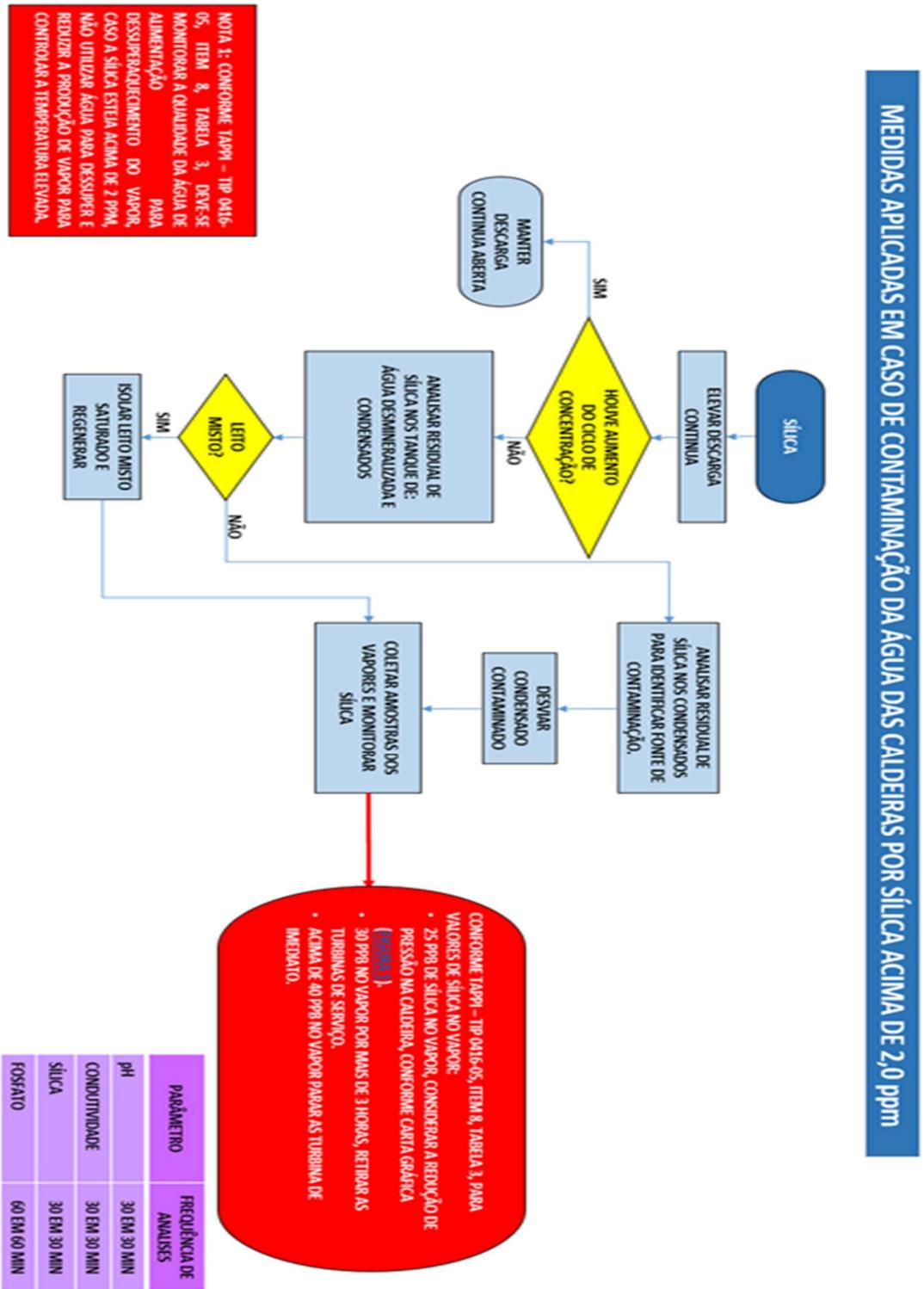
- a) Empregar as ações recomendadas para sílica da água da caldeira entre o limite superior e 120% do limite superior;
- b) Certifique-se de que a purga contínua esteja na taxa máxima;
- c) Iniciar purgas de fundo em uma programação de 30 minutos (somente caldeiras de 2 tambores);
- d) Se as amostras de vapor não estiverem disponíveis e a sílica da água da caldeira permanecer nesta faixa por mais de 3 horas, considere as seguintes ações: reduzir a pressão da caldeira para que a sílica da água da caldeira não exceda a níveis máximos recomendados ou remover turbinas a vapor superaquecidas de serviço.

Sílica da água da caldeira excede 140% do limite superior:

- a) Empregar as ações recomendadas para água de caldeira sílica entre 120 e 140% do limite superior;
- b) Se persistir este alto nível de sílica, considerar o desligamento da caldeira. Ao identificar a fonte de contaminação, elimine-o e lave completamente o sistema antes de colocar a caldeira em serviço.

Conforme exposto anteriormente, são necessários demasiados planos para manter o controle dos níveis de contaminantes na água e em todo processo de tratamento de água e geração de vapor. Abaixo apresentaremos um fluxograma de ações imediatas para contingência de contaminação por sílica.

FIGURA 13 - PLANO DE CONTINGÊNCIA SEGUINDO RECOMENDAÇÕES



Fonte: Tappi, 2022.

6. CONCLUSÃO

Com base em todo este estudo, pode-se concluir que, para ter qualidade no processo de geração de vapor, fatores de prevenção devem ser ajustados conforme o processo inicial de captação do fluido, pesquisas e monitoramento da qualidade desta água a ser utilizada, elementos químicos presentes e forma de pré-tratamento em estações de tratamento de água. Em sequência, antes que este fluido seja utilizado na caldeira, precisará ainda passar por um rigoroso processo de remoção de sólidos dissolvidos e suspenso no tratamento de osmose reversa, garantindo uma geração de vapor com alta qualidade e baixos riscos a caldeira e etapas de vapor como os componentes da turbina, preservando a vida útil do equipamento evitando a manutenção indesejada fora do prazo de campanha normal.

Todo tipo de contaminação, incrustação e depósitos podem trazer grandes transtornos para o processo de geração de vapor, reduzindo a efetividade dos equipamentos e gerando custos elevados.

Dessa forma, conclui-se que a sílica tem se tornado um dos maiores vilões neste processo pelo fato de ser um dos componentes químicos mais abundante na natureza na fase de vapor. Ela tem alta solubilização e, conseqüentemente, ao entrar em contato com as paletas, afetam diretamente na qualidade de geração de energia, reduzindo a eficiência, período de campanha, paradas emergenciais e elevando custos de manutenção.

É possível ainda concluir que os parâmetros de controle de contaminantes presentes na água devem ser respeitados rigorosamente seguindo as orientações e limites de controle criado pela seguradora e tratadora do processo. Portanto, diante uma contaminação, deve-se seguir um plano emergencial de contingência garantindo os ativos interno da caldeira e turbina, trazendo segurança e qualidade para o processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. Editora da UFSC, Florianópolis, SC.

BERTASO, Henrique D'Ávila. **Segurança para Operadores de Caldeiras**. SENAI-RS, 1994.

Berzelius, J. J. **Lehrbuch der Chemie**, 3a. ed., Dresden Leipzig: Germany, 2010.

BUCKMAN: **Introdução ao Tratamento de Águas Industriais**. Campinas: Buckman Laboratórios Ltda. 1997. Disponível em: https://www.buckman.com/wp-content/uploads/2018/04/a877por-h_ptwt_folded.pdf. Acesso em: 01 set. 2022.

DEKKER, Marcel. **Calculations**. New York-Basel - USA., 2003.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/tNyfCDcDBYK9VMwXMMQqnJP/?lang=pt>. Acesso em: 01 set. 2022.

DOW EUROPE SEPARATION SYSTEMS. FILMTEC **Membranes** – Technical Manual, Germany, 1994

DREW AMEROID MARINE. **Shipboard water treatment manual**. USA 1992. Disponível em: https://dlscrib.com/download/water-treatment-manual_58c9f3fcee34352a775cf408_pdf. Acesso em: 01 set. 2022.

DUARTE, Luciana Tavares; HABERT, Alberto Claudio; BORGES, Cristiano Piacsek. **Preparation and morphological characterization of polyurethane/polyethersulfone composite membranes**. Desalination, v. 145, n. 1-3, p. 53-59, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916402003661>. Acesso em: 01 set. 2022.

EDZWALD, James. **Water quality & treatment: a handbook on drinking water**. McGraw-Hill Education, 2011.

GANAPATHY, V. **Industrial boilers and heat recovery steam generators: design, applications, and calculations.** CRC Press, 2002.

HANDBOOK, Ashrae. **Ashrae handbook–fundamentals.** Atlanta, GA, 2009.

HYDRANAUTICS, **Hydranautics** RO System Design Software, Version 64.0©,Hydranautics High Performance Membrane Products. 1998.

INCROPERA, Frank P. ET ALL, **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** LTC. Rio de Janeiro, 2002.

KRIEGER, Guenther Carlos Filho. **Relatório Científico Parcial - Projeto FAPESP.** São Paulo – SP. Disponível em: <https://fapesp.br/avaliacao/relatorios/relatorio2.pdf>. Acesso em: 01 set. 2022.

LOZZA, Giovanni. **Turbine a gas e cicli combinati:** Seconda edizione. 2006.

MARTINELLI Jr., L. C. **Geradores de Vapor – Recepção, Operação e Medidas de Segurança.** Cadernos UNIJUÍ, Série Tecnologia Mecânica, n.º 8, Editora Unijuí, Ijuí, RS,1998.

OMS., O. P. A. S. **Guías para la calidad del agua potable.** Organization of American States, General Secretariat, 1995.

POHL, Pawel. **Application of ion-exchange resins to the fractionation of metals in water.** TrAC Trends in Analytical Chemistry, v. 25, n. 1, p. 31-43, 2006.

RAYAPROLU, Kumar. **Boilers for Power and Process.** Boca Raton - USA : CRC Press, 2009.

RICHTER, Carlos A. **ÁGUA: Métodos e tecnologias de tratamento.** São Paulo, Bloucher, 2009.

SCHLUNDER, Ernst U. **Heat exchanger design handbook.** 1983. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/6336261>. Acesso em: 01 set. 2022.

SILVA, J. I. S.; SILVA, S. K.; FRANÇA, K. B. **Análise da regeneração de resinas Trocadoras de íons para fins de desmineralização de águas**. VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. São Carlos. 2007.

TEMA, **Tema Standards**. New York, USA, 2007.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Fluidos Térmicos - Água, Vapor, Óleos Térmicos**. Editora Hemus. São Paulo.

YAWS, Carl L. **Handbook of Thermodynamics Diagrams** – Vol.I and IV. Houston, USA, 1996.