

CALDEIRAS DE ALTA PRESSÃO: CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO TRATAMENTO DAS ÁGUAS DE ABASTECIMENTO

Willian Zarpelon*
José Carlos Azzolini **

RESUMO

Este artigo abrange o estudo das águas de captação, tratamento aplicado, até a água final para abastecimento das caldeiras de alta pressão de uma empresa de celulose-papel do Oeste de Santa Catarina. Para avaliar a qualidade dessa água, fez-se a coleta de amostras de água de captação, água tratada e retorno do condensado. As análises foram feitas no laboratório de Saneamento e Águas da Unoesc Joaçaba e utilizadas as metodologias aplicadas do *Standard Methods for the examination of water and wastewater 2005*. O projeto contemplou os três pontos selecionados com o intuito de avaliar a qualidade da água de captação, a eficiência do tratamento realizado na empresa e, por meio das amostras de retorno do condensado, constatar se as caldeiras estavam contaminadas. Com o estudo realizado, foi possível constatar que o tratamento realizado na empresa tem eficiência suficiente para atender a uma caldeira com até 70,3 kgf/cm².

Palavras-chave: Caldeiras. Gerador de vapor. Tratamento de água.

1 INTRODUÇÃO

Conforme Rothbarth (2010), atualmente, aproximadamente 40% da energia elétrica produzida no mundo é obtida por intermédio da geração de vapor a partir do carvão mineral. Diferente do modelo mundial, no Brasil, a energia elétrica é produzida por meio das hidroelétricas, que são responsáveis por, aproximadamente, 93% da produção. Em vários setores industriais, como os setores de celulose, sucroalcooleiro e agroindústrias passou-se a utilizar a biomassa como uma fonte nobre de geração de energia. Resíduos florestais (casca de pinus, eucalipto, acículas) e o bagaço de cana-de-açúcar impulsionaram a cogeração de energia.

Rothbarth (2010), ainda, salienta que para fazer o melhor uso desses combustíveis na geração de eletricidade, as empresas desses setores passaram a utilizar caldeiras de alta pressão (acima de 55 bar), as quais geram vapor para as turbinas, e o vapor remanescente sendo utilizado nos processos industriais como agente de aquecimento, ou transportador de calor. As caldeiras de alta pressão requerem água de melhor qualidade para a geração de vapor, com o objetivo de preservar os equipamentos que estão acoplados no sistema de *utilidades*. Sistema de *Utilidades* é o setor da indústria onde estão: sistema de captação de água, tratamento primário e secundário da água, recuperação e tratamento de condensado, torres de resfriamento, caldeiras, turbo-geradores e o sistema de ar comprimido.

O presente trabalho é de fundamental importância, pois por meio dele foi possível verificar se a empresa estudada está trabalhando com segurança, uma vez que um tratamento de água inconsistente pode causar graves acidentes na operação das caldeiras que se beneficiam dessa água para a geração de vapor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS GERADORES DE VAPOR: CALDEIRAS

De acordo com a UFC 3-240-13FN, do Department of Defense of United States of América (2005, p. 33), geradores de vapor, ou caldeiras, como são popularmente conhecidas, são vasos fechados que contêm água e são aque-

* Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Oeste de Santa Catarina; will_zarpelon@hotmail.com

** Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina; Graduado em Química pela Universidade Federal de Santa Maria; jose.azzolini@unoesc.edu.br

cidas por uma fonte externa que converte a água em vapor. Todos os geradores de vapor contêm tubos que separam a água da fonte de calor.

De acordo com Einstein et al. (2001 apud SAIDUR; AHAMED; MASJUKI, 2010, p. 1), todas as indústrias que utilizam energia dedicam proporções significantes do uso de combustíveis fósseis para a produção de vapor: processamento de alimentos utiliza cerca de 57%, celulose e papel utiliza 81%, indústrias químicas dedicam cerca de 42%, refinarias de petróleo utilizam 23% e indústrias de metais primários, cerca de 10%.

2.1.1 Tipos de Caldeiras

Os geradores de vapor corriqueiramente utilizados na indústria são conhecidos como caldeiras. Geralmente, as caldeiras podem ser classificadas em: aquotubulares, flamotubulares e elétricas.

De acordo com a UFC 3-240-13FN, do Department of Defense of United States of América (2005, p. 33), caldeiras flamotubulares são aquelas em que o fogo e o gás quente de combustão passam pelo interior dos tubos dos geradores de vapor e a água a ser transformada em vapor passa por fora dos tubos. São caldeiras utilizadas para pequenas capacidades de geração de vapor.

Conforme Leite e Militão (2008), nas caldeiras aquatubulares, como o próprio nome indica, há circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes envolvendo-os. São usadas para instalações de maior porte e obtenção de vapor superaquecido. A água circula várias vezes através do conjunto tubulão-coletores, desce pelos tubos externos e retorna pelos internos. Essa circulação natural é provocada pela diferença de pressão exercida pelas colunas líquidas e pelas correntes de convecção formadas. A coluna externa, que contém somente água, é mais pesada do que a coluna interna, que contém água mais vapor, o que promove a circulação. A parte vaporizada armazena-se no “tubulão”, enquanto o líquido volta a circular.

As caldeiras elétricas são convenientes quando houver abundância de energia elétrica e quando os custos forem compensadores. Sua aplicação é bastante restrita e também são projetadas para fornecerem apenas vapor saturado. As caldeiras elétricas têm o princípio de funcionamento fundamentado na conversão direta da energia elétrica em energia térmica, mediante o uso de resistências ou de eletrodos submersos (SAREV; MARTINELLI JÚNIOR, 1998; BAZZO, 1995).

As unidades geradoras de vapor são construídas de acordo com normas ou códigos vigentes no País e de forma a melhor aproveitar a energia liberada pela queima de um determinado tipo de combustível. Sua estrutura é bastante diversificada. Unidades modernas e de porte maior são, normalmente, equipadas com os seguintes componentes: fornalha, caldeira, superaquecedor, economizador e aquecedor de ar (BAZZO, 1995).

2.1.2 Classificação das caldeiras

Conforme a NBR 12177-1, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (1999, p. 6), as caldeiras são classificadas, perante a sua faixa de pressão de trabalho, da seguinte maneira:

- a) caldeiras da categoria A são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²);
- b) caldeiras da categoria C são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm²) e o volume interno é igual ou inferior a 100 L (cem litros);
- c) caldeiras da categoria B são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

Para a Associação Nacional de Águas (ANA) (2009, p. 150), as caldeiras podem ser classificadas de maneira diferente, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação geral das caldeiras quanto à pressão de trabalho

Caldeira	Pressões	
	Psig	Kgf/cm ²
Baixa pressão	100 – 400	7 – 28
Média pressão	400 – 800	28 – 56
Alta pressão	800 – 3.000	56 – 211
Pressão supercrítica	Acima de 3.000	Acima de 211

Fonte: Agência Nacional de Águas (2009, p. 150).

2.2 ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO

A água é o principal fluido usado em sistemas de geração de vapor.

Conforme Sperling (2005, p. 15), o conceito de qualidade da água é muito mais amplo do que a simples caracterização da água pela fórmula molecular H₂O. Isto porque a água, em decorrência das suas propriedades de solvente e da sua capacidade de transportar partículas, incorpora a si diversas impurezas, as quais definem sua qualidade.

Segundo Dantas (1998), as impurezas podem ser classificadas em quatro tipos principais:

- sólidos dissolvidos, nos quais se destacam os sais de cálcio, magnésio e ferro, sílica, bicarbonatos, carbonatos, cloretos e sulfatos;
- sólidos em suspensão: geralmente constituídos de materiais particulados, responsáveis pela turbidez da água;
- gases dissolvidos: entre os principais gases encontrados tem-se o oxigênio e o gás carbônico e menos frequentemente a presença de amônia, gás sulfídrico e cloro;
- microrganismos.

De acordo com a UFC 3-240-13FN, do Department of Defense of United States of América (2005, p. 9), há duas fontes mais comuns de água para abastecimento de geradores de vapor:

- água subterrânea: obtida em poços e poços artesianos. Essa água contém uma grande quantidade de minerais dissolvidos e é, normalmente, de qualidade boa; pode variar com os períodos do ano e as condições do aquífero em que a água é obtida. Ao se tratar essa água, pode-se aumentar a sua qualidade
- água de superfície: água encontrada em rios e lagos. A qualidade dessa água varia muito com a época do ano e as condições do clima local, com maior turbidez e sólidos suspensos durante as épocas chuvosas. Ao tratá-la, pode-se tornar água boa para abastecimento de caldeiras, o que depende do tratamento aplicado.

A análise físico-química da água a ser utilizada fornece subsídios para a identificação dos contaminantes, o que permite a escolha de um ou mais métodos de tratamento externo, cuja finalidade é alterar a qualidade da água antes do ponto de utilização (SAREV; MARTINELLI JÚNIOR, 1998).

2.3 PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS ANÁLISADOS NAS ÁGUAS PARA ABASTECIMENTO DE GERADORES DE VAPOR

O Quadro 1 apresenta alguns parâmetros físico-químicos normalmente analisados em águas destinadas à geração de vapor:

Quadro 1 – Parâmetros básicos de tratamento para caldeiras de baixa, média e alta pressão

Parâmetros	Valores limite							
	0 - 21,1	21,1 - 31,6	31,6 - 42,2	42,2 - 52,7	52,7 - 63,3	63,3 - 70,3	70,3 - 105,5	105,5 - 140,6
Pressões (kgf/cm ²)	0 - 21,1	21,1 - 31,6	31,6 - 42,2	42,2 - 52,7	52,7 - 63,3	63,3 - 70,3	70,3 - 105,5	105,5 - 140,6
Qualidade na água de alimentação								
OD (mg/L)	< 0,007							
Ferro total (mg/L)	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,03	≤ 0,025	≤ 0,02		≤ 0,01	
Cobre total (mg/L)	≤ 0,05	≤ 0,025	≤ 0,02		≤ 0,015	≤ 0,01		
Dureza total (mg/L)	≤ 0,3		≤ 0,2		≤ 0,1	≤ 0,05	0	
pH (a 25 °C)	8,3 - 10					8,8 - 9,6		
COT (mg/L)	< 1		< 0,5			< 0,2		
OG (mg/L)	< 1		< 0,5			< 0,2		
Qualidade na água da caldeira								
Sílica (mg/L)	≤ 150	≤ 90	≤ 40	≤ 30	≤ 20	≤ 8	≤ 2	≤ 1
Alcalinidade total (mg/L)	≤ 350	≤ 300	≤ 250	≤ 200	≤ 150	≤ 100	NE	NE
Condutividade	5,4 - 1,1	4,6 - 0,9	3,8 - 0,8	1,5 - 0,3	1,2 - 0,2	1 - 0,2	≤ 0,150	≤ 0,080
STD	4,32 - 0,88	3,68 - 0,63	3,04 - 0,56	1,2 - 0,21	0,96 - 0,14	0,7 - 0,14	≤ 0,105	≤ 0,048

Fonte: Agência Nacional de Águas (2009).

2.4 PROBLEMAS RELACIONADOS COM A QUALIDADE DA ÁGUA

Alguns problemas ocorrem nas caldeiras quando são abastecidas com águas que não atendem aos parâmetros básicos de tratamento para geração de vapor de alta pressão, como: corrosões, depósitos e arrastes.

2.4.1 Corrosão

De acordo com a UFC 3-240-13FN, do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (2005, p. 2), o termo corrosão refere-se à deterioração do metal resultante da tendência de um metal refinado voltar ao seu estado original (ou seja, o minério a partir do qual foi produzido o metal refinado). O processo de corrosão envolve uma série de reações eletroquímicas. Metais que têm contato com água em qualquer tipo de sistema de água podem corroer se não houver uma tentativa de protegê-los.

A corrosão é um dos entraves mais sérios em sistemas geradores de vapor, pois pode ocasionar acidentes, perda de material e parada do equipamento para a manutenção. É um processo eletroquímico capaz de se desenvolver em meio ácido, neutro ou alcalino, na presença ou não de aeração, podendo ser acelerado pela presença de oxigênio dissolvido; teores elevados de cloro, presença de íons cobre e níquel, responsáveis pela formação de pilhas galvânicas, sólidos em suspensão que se depositam facilmente, de forma não aderente, em regiões estagnantes e de alta transferência de calor (GENTIL, 1996).

Conforme *Drew Marine Division* (2001, p. 60), o oxigênio dissolvido é a causa primária para todos os tipos de corrosão. A quantidade de oxigênio que a água contém é dependente da temperatura da água, uma vez que a água fria tem capacidade de dissolver mais oxigênio do que a água quente. Grande parte do oxigênio vem da água de compensação.

2.4.2 Depósitos

Para Demadis (2007, p. 40), quando a sílica é deixada sem controle, forma depósitos duros e viscosos que são difíceis e perigosos de serem removidos. Eles causam uma redução drástica na taxa de transferência de calor dos equipamentos, falha nos tubos causada pelo superaquecimento, aumento do uso de combustíveis e, conseqüentemente, redução da eficiência do equipamento.

De acordo com a UFC 3-240-13FN, do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (2005, p. 2), o termo depósitos refere-se a uma ampla categorização de resíduos. Depósitos são compostos de escala mineral, matéria biológica e materiais suspensos ou insolúveis (por exemplo, lama, sujeira ou subprodutos de corrosão). Depósitos podem ser criados pela fixação de materiais de formação de depósitos na tubulação ou superfícies de equipamentos, ou por sedimentação e acumulação.

Quanto maior a temperatura de operação de uma caldeira, menor tolerância aos depósitos ela oferece; conseqüentemente, a presença de depósitos além de dificultar a troca de calor, pode romper os tubos de metal da caldeira, acarretar perda de resistência mecânica e deformações, em razão do superaquecimento deles, além de restringir a área do fluxo de escoamento na linha e possíveis obstruções nas válvulas, resultando em perdas e reposições caras. Entre as incrustações nos tubos de caldeiras provenientes de sais minerais dissolvidos encontrados na água de alimentação, pode-se citar: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, silicatos de cálcio e magnésio, silicatos complexos contendo ferro, alumina, cálcio e sódio, borras de fosfatos de cálcio ou magnésio e óxidos de ferro não protetores.

2.4.3 Arraste

O arraste representa uma condição de transporte da água e suas impurezas minerais pelo vapor destinado à seção pós-caldeira. Tal fenômeno ocorre em caldeiras que operam nas mais diversas pressões, influenciando diretamente na pureza do vapor. Suas causas podem ser mecânicas ou químicas. As mecânicas são em decorrência das flutuações repentinas e excessivas de carga e operação em níveis superiores ao projetado, entre outras. Já as químicas são em razão da presença excessiva de sólidos dissolvidos ou em suspensão, sílica ou alcalinidade. As principais conseqüências do arraste são danos nas turbinas e outros equipamentos, formação de depósitos nos separadores, válvulas de redução, aparelho separador de vapor, na seção pós-caldeira e perda de produção (DANTAS, 1988).

2.5 TRATAMENTO DA ÁGUA

O tratamento de água é em razão do tipo de caldeira, sua pressão de trabalho e composição da água, da taxa de vaporização e do modo de utilização do vapor, entre outros. Os programas de prevenção de corrosão em caldeiras consistem em tratamentos externos nas águas de alimentação e tratamentos internos nas águas de caldeiras. O significado de purificar uma água consiste na remoção das substâncias que comprometem a qualidade do efluente, sob o ponto de vista químico, físico, organoléptico e bacteriológico. As águas brutas diferem em qualidade e os métodos usados para a sua purificação dependem das suas condições e do grau de purificação necessário (SAREV; MARTINELLI JÚNIOR, 1998).

2.5.1 Métodos externos de tratamento de águas de abastecimento para unidades geradoras de vapor

Atualmente existem vários métodos de tratamentos externos para águas de caldeira, cada um com um determinado objetivo.

2.5.1.1 Clarificação

Conforme a *General Electric Company* (2012), a clarificação é feita em etapas, com uma prévia coagulação, uma posterior floculação e a sedimentação.

Segundo Crittenden et al. (2012), a coagulação é um processo de tratamento químico, que faz as partículas de impurezas se unirem, o que forma partículas maiores e mais fáceis de serem retiradas por processo mecânico, isso sem mudanças significantes na estrutura química da água.

Para a *General Electric Company* (2012), a floculação, aglomeração das partículas em partículas desestabilizadas grandes, pode ser melhorada pela adição de polímeros orgânicos com elevado peso molecular e solúveis em água. Esses polímeros aumentam o tamanho dos flocos por ligações moleculares fortes e por pontes moleculares.

2.5.1.2 Sedimentação

Segundo a *General Eletric Company* (2012), a sedimentação se refere ao processo físico de remoção por suspensão ou separação que ocorre depois que as partículas já passaram pela coagulação e floculação. Se a sedimentação fosse realizada sem a prévia coagulação e floculação, a parcela de sólidos suspensos removidos seria bem menor.

2.5.1.3 Filtração

De acordo com a *General Eletric Company* (2012), a filtração é utilizada em adição ao processo regular de coagulação e sedimentação para a remoção de sólidos suspensos de águas de superfície. Esse processo prepara a água para o uso como potável, para geradores de vapor, ou água de resfriamento. A filtração, normalmente considerada um simples processo mecânico, na verdade envolve os mecanismos de absorção (física ou química), sedimentação, interceptação, difusão e compactação inercial.

2.5.1.4 Abrandamento

Para a ANA (2009, p. 147), o abrandamento consiste na remoção total ou parcial dos cátions Ca e Mg presentes, normalmente, na forma de bicarbonatos, sulfatos e cloretos. Basicamente, existem três processos de abrandamento de uma água: dois por precipitação, com utilização de cal sodada a frio ou a quente e cal sodada a quente com fosfatos, hoje em desuso, e um terceiro, pela troca de cátions e ânions indesejáveis por cátions e ânions desejáveis, com o uso de resinas, mais adotado atualmente nas usinas.

2.5.1.5 Desmineralização

Conforme a ANA (2009, p. 148), o processo de desmineralização ou deionização é recomendável para águas utilizadas nas caldeiras, o que visa praticamente remover a totalidade de íons presentes na água. Existem vários arranjos com esse objetivo, o que varia de acordo com a qualidade da água a ser tratada. Basicamente, a água passa em uma coluna de resinas catiônicas na forma H^+ e, em seguida, em uma coluna com resina aniônica na forma OH^- .

2.5.1.6 “Desaeração” Térmica

Segundo a ANA (2009, p. 149), a remoção de oxigênio dissolvido na água, assim como de outros gases que podem causar corrosão nas caldeiras, pode ser feita em desaeradores. São equipamentos que se baseiam no fato da solubilidade de um gás em um líquido ser inversamente proporcional à temperatura, sendo praticamente zero no ponto de ebulição. Os condensadores retornados das caldeiras também sofrem esse tipo de tratamento, com a água de reposição. Assim, injeta-se vapor em contracorrente com a água de alimentação, o que visa arrastar os gases dissolvidos.

2.6 RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS ENVOLVIDOS, AS POSSÍVEIS COMPLICAÇÕES E COMO TRATAR DE MANEIRA COERENTE CADA CASO

No Quadro a seguir são apresentados os parâmetros de qualidade da água e os problemas que podem ser causados na presença deles na água de abastecimento em excesso. Para cada parâmetro não conforme com a norma, são apresentadas soluções para os problemas.

Quadro 2 – Parâmetros analisados com suas respectivas interferências nos sistemas geradores de vapor e meios de tratamento

Constituinte	Dificuldades Causadas	Meios de Tratamento
Turbidez	Má aparência da água; depósitos em linhas de água, equipamentos, etc.	Coagulação, sedimentação e filtração.
Dureza	Presença de sais de cálcio e magnésio. Maior fonte de incrustações em equipamentos de troca térmica, caldeiras, linha de tubos, etc.	Abrandamento; desmineralização; tratamento interno para caldeiras; agentes ativados de superfície.
Alcalinidade	Presença de bicarbonatos (HCO ₃ ⁻), carbonatos (CO ₃ ²⁻) e hidróxidos (OH ⁻). Espuma e arraste com vapor; fragilização do aço da caldeira; bicarbonato e carbonato produz CO ₂ no vapor, uma fonte de corrosão em linhas de condensado.	Abrandamento com cal e soda cáustica; tratamento com ácido; abrandamento com hidrogênio zeólito; desmineralização por troca iônica.
Dióxido de carbono	Corrosão em linhas de água, particularmente vapor e linhas condensados.	Aeração, “desaeração”, neutralização com bases.
pH	O pH varia de acordo com sólidos ácidos e alcalinos na água; a maioria das águas naturais possui um pH de 6.0-8.0.	O pH pode ser aumentado por bases e decrescido por ácidos.
Sulfato	Se adiciona aos constituintes sólidos da água, mas sozinho, normalmente, não é significativo. Se combina com cálcio para formar incrustações de sulfato de cálcio.	Desmineralização, osmose reversa, eletrodialise, evaporação.
Cloro	Se adiciona aos constituintes sólidos e aumenta o caráter corrosivo da água.	Desmineralização, osmose reversa, eletrodialise, evaporação.
Sílica	Incrustações em caldeiras e sistemas de resfriamento de água.	Processo de remoção por sais de magnésio a quente e morno; absorção por troca iônica com resinas de bases fortes, em conjunto com desmineralização, osmose reversa, evaporação.
Ferro e manganês	Mancha a água de precipitação; fonte de depósitos nas linhas de água, caldeiras, etc.; interfere com tingimento, bronzeamento, fabricação de papel.	Aeração; coagulação e filtração; amolecimento a cal; troca catiônica; filtração por contato; agentes superficiais ativos para retenção de ferro ou manganês.
Oxigênio	Corrosão nas linhas de água, trocadores de calor, caldeiras, linhas de retorno, etc.	Desaeração; sódio sulfito; inibidores de corrosão.
Sólidos dissolvidos	Refere-se ao total de matéria dissolvida, determinado por evaporação; grande concentração é condenável por interferir no processo e ser causa de espuma em caldeiras.	Abrandamento com cal e troca catiônica; desmineralização, osmose reversa, eletrodialise, evaporação.
Sólidos suspensos	Refere-se à matéria não-dissolvida, determinada pelo método gravimétrico; causa depósitos em trocadores de calor, caldeiras, linhas de água, etc.	Sedimentação; filtração, usualmente procedida de coagulação e sedimentação.

Fonte: adaptado de *General Electric Company* (2012).

3 METODOLOGIA

Primeiramente, foi necessário descrever a sequência lógica do desenvolvimento da pesquisa, para então definir a empresa a firmar parceria e executar a pesquisa. Posteriormente, foi elaborada uma fundamentação teórica baseada em autores e *sites* renomados. Um questionário foi aplicado na empresa para avaliar os métodos e as exigências do tratamento. A partir da coleta de amostras de água nos três diferentes pontos (água bruta, tratada e de retorno do condensado), foi possível construir uma base de dados, essencial para o posterior julgamento do tratamento realizado na empresa. Após o trabalho concluído, tem-se a possibilidade de estendê-lo para pesquisas futuras ou não.

3.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

As análises foram realizadas no Laboratório de Saneamento e Águas da Unoesc Joaçaba. Os parâmetros analisados, as metodologias e os equipamentos utilizados estão apresentadas na Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros analisados, metodologia e equipamentos

Parâmetro	Metodologia	Equipamentos (Marca/Modelo)
pH	Potenciometria – SM* 4500-H+B	pHmetro Quimis Q400A
Sólidos dissolvidos totais	Condutivimetria	Condutivímetro Quimis – Q485M
Condutividade	Condutivimetria – baseado no SM 2510 B	Condutivímetro Quimis – Q485M
Cor aparente	Colorimetria	Spectroquant Pharo 300 Merck
Cloreto	Titulação argentométrica – SM 4500-Cl-A	–
Dureza total	Titulação complexométrica – SM 2340 C	–
Alcalinidade	Titulométrico SM 2320 B	–
Sílica	Molibdosilicato SM SiO ₂ C	–
Sulfato	Colorimetria – APHA 4500 – SO ₄ – 2 E	Spectroquant Pharo 300 Merck
Fosfato	Colorimétrico Merck análogo SM 4500-P E	Spectroquant Pharo 300 Merck
Oxigênio dissolvido	Eletrodo de membrana SM 4500-O G	YSI 550A
Sulfito	Colorimétrico Merck	Spectroquant Pharo 300 Merck
Turbidez	Nefelometria – SM 2130 B	Turbidímetro Oakton T – 100

Fonte: os autores.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS

As análises dos dados foram executadas com base nos resultados obtidos nas análises das amostras e comparação com a norma presente no Quadro 1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA CALDEIRA DE MAIOR EXIGÊNCIA NA EMPRESA

As informações sobre a caldeira de maior exigência, que requer o melhor tratamento de água na empresa, foram obtidas por meio de um questionário aplicado aos operadores da caldeira.

A caldeira de maior exigência é a HPB, uma caldeira Aquatubular modelo VS-500, que está sendo usada há, aproximadamente, 10 anos. Segundo os operadores, o estado da caldeira é ótimo e está melhorando ainda mais com o tempo de operação, sendo possível analisar e fazer alguns ajustes necessários conforme inspeções realizadas anualmente. A finalidade do vapor gerado na caldeira é o cozimento e a secagem do papel, assim como a geração de energia elétrica por intermédio de uma turbina a vapor. A caldeira trabalha em uma faixa de 64 Kgf/cm² de pressão, com uma

capacidade de gerar 90 toneladas/hora de vapor. A água de alimentação para essa caldeira provém dos rios de captação Rio do Mato e Barraginha. Ela passa pelos tratamentos que serão descritos na seção 4.2.

4.2 AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA A CALDEIRA

Para alcançar os parâmetros da água desejáveis para o abastecimento de caldeiras, são possíveis diversos tipos de tratamentos que podem ser empregados. Na empresa analisada, os tipos de tratamento realizados são:

- Filtro primário, com diferentes granulções de pedras, o qual começa com pedras maiores até pedras menores e permite que pouca matéria sólida passe para as etapas seguintes do tratamento.
- “Desaerador”, onde a água passa por várias canaletas, obrigando-a a mudar constantemente de direção e, assim, agitando e proporcionando uma “desaeração” na água.
- Clarificação, que é feita com a adição de um polímero responsável por unir as moléculas de impurezas, caracterizando a etapa de coagulação. Após a coagulação, é feita a floculação, na qual as moléculas maiores são unidas pela ação de outro polímero com peso molecular maior e grande solubilidade em água. Depois disso, o processo final é feito pela ação da gravidade, em que as moléculas decantam, e a água passa para o próximo tanque.
- Tanque de leito misto, onde a água passa pela filtração por meio de areia e carvão ativado.
- Depois disso, a água passa por um tanque catiônico e um tanque aniônico, onde irá trocar íons indesejáveis (Mg, Na, Ca, Fe, CO₃, SO₃, Cl, etc.) para a água por íons desejáveis (H⁺ e OH⁻).
- A água é transportada para o tanque acumulador e estará pronta para o abastecimento das caldeiras.

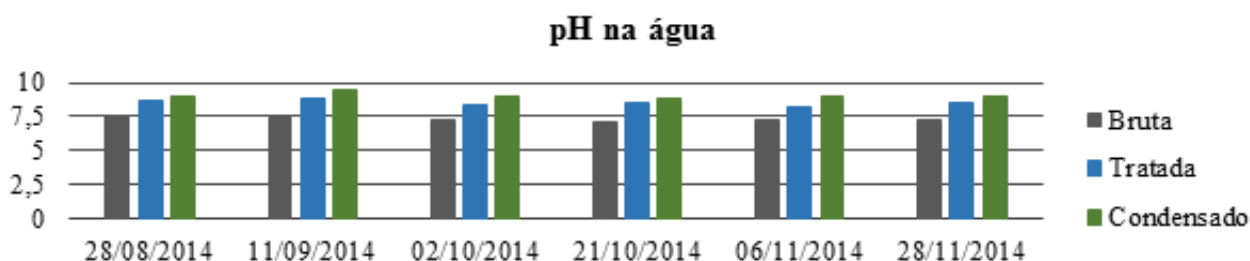
4.3 RESULTADOS

A obtenção dos resultados foi feita por meio dos métodos descritos na Tabela 2 e é importante para poder avaliar a qualidade do tratamento e se este tem eficiência suficiente para cumprir a norma descrita no Quadro 1.

4.3.1 pH

O pH indica se a água está ácida e se tem presença de carbonetos e bicarbonatos. É indicada uma faixa de 8,8 a 9,5 para esse parâmetro.

Gráfico 1 – Parâmetro pH



Fonte: os autores.

Conforme o Gráfico 1, o pH na água de captação é, em média, 7,3, o que é comum para as águas de rio. Após o tratamento, a água fica, em média, com um pH de 8,5 e retorna no condensado com 9. Isso mostra que o tratamento é eficiente e respeita os padrões de pH mostrados no Quadro 1.

4.3.2 Sólidos Dissolvidos

O parâmetro sólidos dissolvidos indica a quantidade de substâncias dissolvidas na água. Estas, presentes em águas utilizadas para geração de vapor, originaram a formação de incrustações e corrosões em tubulações, de água quente, bem como provocam os fenômenos de arraste e “espumação” em caldeiras e tubos.

Gráfico 2 – Parâmetro Sólidos Dissolvidos



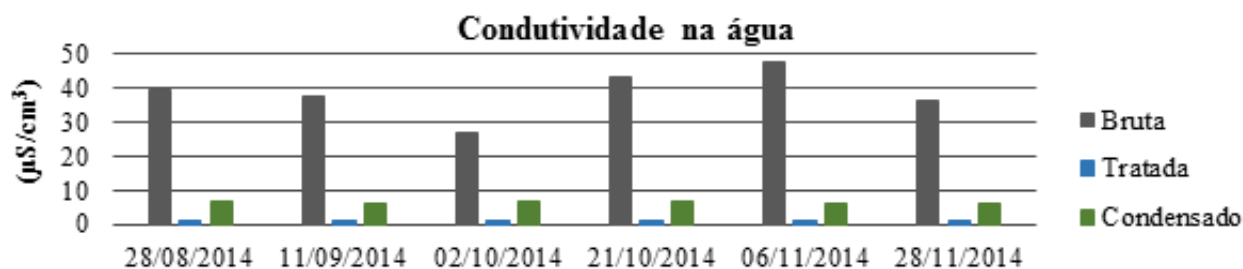
Fonte: os autores.

Conforme o Gráfico 2, verifica-se que a água bruta de captação chega ao sistema de tratamento da empresa com média de 19,23 mg/l de sólidos dissolvidos. Após o tratamento, esse parâmetro diminui para 0,47 mg/l representando uma eficiência do sistema de tratamento de 97,55%. O condensado da água da caldeira passa a ter 2,72 mg/l de sólidos dissolvidos, ou seja, um acréscimo de 478,72% em relação à água tratada e à água de condensado; esses valores mostram a presença de sólidos dissolvidos no interior dela.

4.3.3 Condutividade

O parâmetro de qualidade condutividade mede em $\mu\text{S}/\text{cm}^3$ a capacidade que uma solução aquosa possui para conduzir corrente elétrica. Isso ocorre em razão da presença de uma certa concentração de íons cátions e ânions nessa solução.

Gráfico 3 – Parâmetro Condutividade



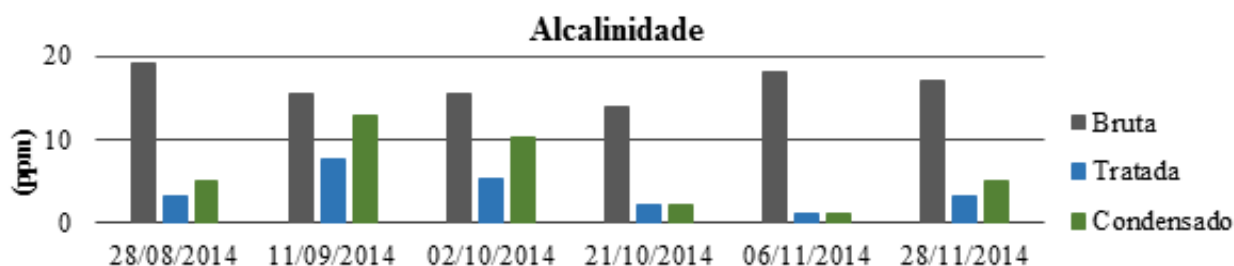
Fonte: os autores.

O Gráfico 3 mostra que o parâmetro de qualidade condutividade na água bruta de captação é de $38,33 \mu\text{S}/\text{cm}^3$. Após ela passar pelo sistema tratamento, passa a ter um valor médio de $0,82 \mu\text{S}/\text{cm}^3$, mostrando uma eficiência do sistema de tratamento de 97,86% em relação à água bruta. A água de retorno em forma de condensado na caldeira possui em média um valor de condutividade de $6,41 \mu\text{S}/\text{cm}^3$, representando um acréscimo de 671% desse parâmetro em relação à água tratada de entrada da caldeira.

4.3.4 Alcalinidade

O parâmetro alcalinidade é uma medida dos componentes básicos da água, geralmente, bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, no caso de águas naturais.

Gráfico 4 – Parâmetro Alcalinidade



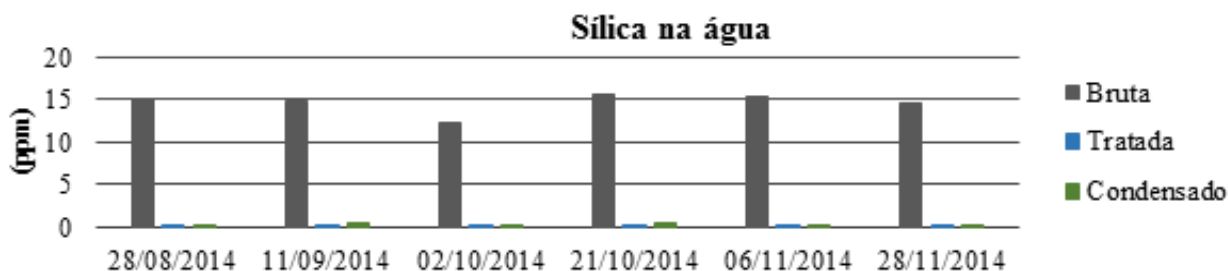
Fonte: os autores.

Conforme o Gráfico 4, verifica-se que a alcalinidade média da água bruta de captação no período de estudo é de 16,47 ppm. Após tratamento, ela passa a ter um valor médio de 3,64 ppm, sendo a eficiência do sistema de 78,51% em relação aos valores encontrados na água bruta e água tratada. Já a água de retorno em forma de condensado passa a ter um valor médio de 6,02 ppm, ou seja um acréscimo de 39,53% em relação à água tratada de entrada da caldeira, mostrando novamente que no interior da máquina há acúmulo de íons indesejáveis retidos no seu interior.

4.3.5 Sílica

A sílica pode causar graves problemas nas caldeiras e seus acessórios. Ela é responsável pelo fenômeno de arraste, pelas incrustações e pela corrosão. Por isso é de extrema importância controlar esse parâmetro com severidade.

Gráfico 5 – Parâmetro Sílica



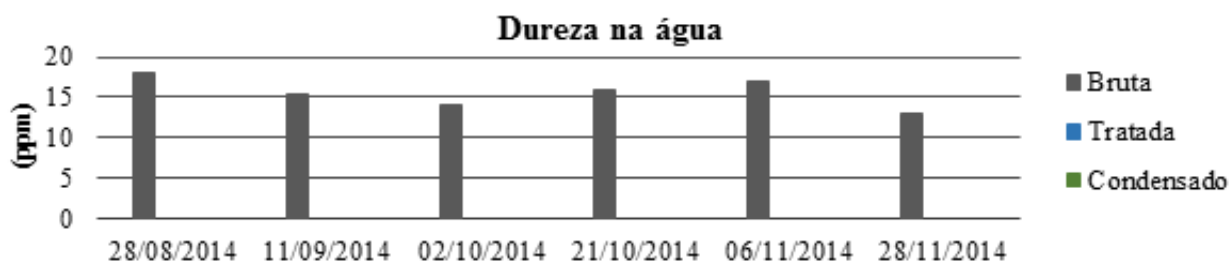
Fonte: os autores.

Conforme o Gráfico 5, o parâmetro sílica medido na água de captação do rio (Bruta) fica em uma média de 14,65 ppm. Depois de passar por todo o tratamento, esse valor médio cai para 0,02 ppm (20 ppb), uma eficiência de 99,86%, e ao retornar pelo condensado, a água apresenta uma média de 0,29 ppm de sílica, o que representa um aumento de 1350% em relação à água tratada.

4.3.6 Dureza

A dureza é muito importante para a água de abastecimento de caldeiras, pois mostra a concentração de íons Mg e Ca presentes na água, estes responsáveis por incrustações nas caldeiras.

Gráfico 6 – Parâmetro Dureza



Fonte: os autores.

Conforme o Gráfico 6, é possível perceber que o tratamento realizado na empresa possui, aproximadamente, 100% de eficiência. É possível observar no Gráfico 6 que a água de captação chega com uma média de 15,58 ppm e sai do tratamento e do condensado com um valor muito próximo de zero ou zero.

4.3.7 Demais parâmetros

Os demais parâmetros não demonstraram uma concentração elevada na água de captação, portanto não é importante mencioná-los separadamente. Isso pode ser explicado em razão de a água de captação ser proveniente de rios.

Os parâmetros estão todos dentro da norma descrita no Quadro 1 e são: Fosfatos, Sulfitos, Sulfatos e Cloretos.

O parâmetro oxigênio dissolvido não foi considerado, pois foi avaliada a água na saída do tratamento externo e esse parâmetro é tratado logo na entrada da caldeira, depois do processo de tratamento externo, portanto não foi possível medir a eficiência do tratamento de oxigênio dissolvido.

5 CONCLUSÃO

Tratamentos de água para o abastecimento de geradores de vapor devem ser consistentes e minuciosos, conforme a pressão de trabalho que o componente irá operar. Atualmente, existem diversas tecnologias e produtos químicos com potencial para tratar a água que irá servir de matéria-prima para a caldeira, e cabe ao grupo de engenheiros responsáveis selecionar o melhor tipo de tratamento, que garanta a eficiência suficiente e o menor preço para a produção de vapor de qualidade.

Mediante o trabalho realizado, foi possível constatar os possíveis tratamentos realizados para o abastecimento de água a uma caldeira de alta pressão, até 70,3 kgf/cm², e avaliar sua eficiência conforme os resultados obtidos nas análises realizadas a partir das amostras coletadas na empresa.

Conforme as análises realizadas durante o período selecionado, é possível constatar que a água tratada na empresa apresenta uma qualidade suficiente para atender à caldeira de alta pressão. No entanto, esta água tratada é depositada em um tanque acumulador para, então, ser dissipada para o abastecimento da caldeira. Nesse tanque acumulador, encontram-se as águas que acabaram de ser tratadas e também as águas que voltam da caldeira em forma de condensado. Por meio das análises laboratoriais, é possível afirmar que a água do condensado não tem qualidade suficiente para atender à caldeira de alta pressão, pois apresenta um aumento significativo de componentes indesejáveis na sua estrutura. Esse aumento é causado pelo contato da água tratada com tubulações que apresentam algum tipo de problema, como incrustações ou corrosões.

Para operar com segurança e aumentar a vida útil da caldeira de alta pressão, é indicado o tratamento da água do retorno do condensado passando por deionização novamente.

High pressure boilers: characterization and evaluation of the quality of the supply water treatment*Abstract*

This article covers the study of extraction water, applied treatment, until the final water to supply the high pressure boiler of a pulp-paper company in the West of Santa Catarina. To evaluate the quality of that water, it was collected samples in the capture, treated water and condensate return. The analyzes were performed in the laboratory of “Saneamento e Águas” of Unoesc-Joaçaba and were used the methodologies of the Standard Methods for the examination of water and wastewater 2005. The project included the three points selected in order to evaluate the quality of water abstraction, the efficiency of the treatment performed in the company and through the condensate return samples, to ascertain if the boilers were contaminated. With the realized study, it was possible to find that the treatment performed in the company Celulose Irani S/A has a enough efficiency to attend a boiler up to 70,3 kgf/cm².

Keywords: Boilers. Steam generators. Water Treatment.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. União da Indústria da Cana-de-açúcar. Centro de Tecnologia Canavieira. **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília, DF, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12177-1 – Caldeiras estacionárias a vapor – Inspeção de segurança – Caldeiras flamatubulares**. Brasília, DF, 1999.
- BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 1995.
- CRITTENDEN, John Charles et al. **Water Treatment: principles and design**. 3rd. ed. New Jersey: MWH, 2012.
- DANTAS, Evandro. **Geração de vapor e água de refrigeração: falhas, tratamento, limpeza química**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO), 1988.
- DEMADIS, Konstantinos Dimitri. **Industrial water systems: problems, challenges and solutions for the process industries**. Voutes-Heraklion, Grécia: Department of Chemistry, University of Crete, 2007. Disponível em: <<http://www.chemistry.uoc.gr/demadis/pdfs/28-aqua-2005%20paper.pdf>>. Acesso em: 03 jul. 2014.
- DEPARTMENT OF DEFENSE OF UNITED STATES OF AMERICA. Unified Facilities Criteria (UFC) 3-240-13FN – **Industrial Water Treatment Operation And Maintenance**. Estados Unidos da América, 25 maio 2005. Disponível em: <http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_240_13fn.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2014.
- DREW MARINE DIVISION. **Shipboard Water Treatment Manual**. Nova Jersey: Ashland Specialty Chemical Company, 2001.
- GENERAL ELETRIC COMPANY. **Handbook of industrial water treatment**. 1997-2012. Disponível em: <<http://www.gewater.com/handbook/index.jsp>>. Acesso em: 04 ago. 2014.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- 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 jul. 2014.
- ROTHBARTH, Arno. Tratamento de água para caldeiras de alta pressão. **Revista e Portal Meio Filtrante**, v. 42, jan./fev. 2010. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=563&revista=n42>. Acesso em: 03 dez. 2014.
- SAIDUR, Rahman; AHAMED, Jamal Uddin; MASJUKI, Haji Hassan. **Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers**. Department of Mechanical Engineering, University of Malaya. Kuala Lumpur. Malaysia, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509009422>>. Acesso em: 03 jul. 2014.

SAREV, Allan Sven; MARTINELLI JUNIOR, Luiz Carlos. Características e tratamento da água para geradores de vapor. **Cadernos Unijuí**, Série Tecnologia Mecânica, n. 7, 1998.

SPERLING, Marcos Von. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Minas Gerais: SEGRAC, 2005.