

UBIRATAN CARNEZZELLA MADUREIRA

**ANÁLISE DE DANOS INTERNOS NOS TUBOS DOS TROCADORES DE CALOR
DAS UNIDADES GERADORAS DA UHE BARRA GRANDE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Centro Universitário UNIFACVEST
como parte dos requisitos para a obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Alisson Oliveira

Orientador: MSc. Reny Aldo Henne

LAGES

2018

UBIRATAN CARNEZZELLA MADUREIRA

**ANÁLISE DE DANOS INTERNOS NOS TUBOS DOS TROCADORES DE CALOR
DAS UNIDADES GERADORAS DAUHE BARRA GRANDE**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro Universitário
UNIFACVEST como parte dos requisitos
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Prof. Alisson Oliveira

Orientador: MSc. Reny Aldo Henne

Lages, SC ___/___/2018. Nota: _____

Prof. Dr. Rodrigo Botan

LAGES

2018

ANÁLISE DE DANOS INTERNOS NOS TUBOS DOS TROCADORES DE CALOR DAS UNIDADES GERADORAS DA UHE BARRA GRANDE

Ubiratan Carnezzella Madureira¹
Renny Aldo Henne²

RESUMO

A perda de calor no gerador é retirada na sua maior parte, através dos trocadores de calor ar-água. O sistema de resfriamento do gerador é constituído pelo circuito fechado de ventilação e pelo circuito de água de resfriamento. No circuito fechado de ventilação o ar é succionado pelas aberturas na parte superior da aranha do rotor, os braços da aranha operam como um ventilador radial. O ar passa pelos canais de ventilação no anel magnético do rotor, resfria a região do entreferro e enrolamento. Passando pelos dutos de ventilação do núcleo estatórico, o ar resfria o núcleo e conseqüentemente retira o calor do enrolamento. Parte do ar se distribui para as cabeças superiores e inferiores do enrolamento. Na saída da carcaça o ar passa pelos trocadores de ar-água, onde se processa a troca térmica. Saindo dos radiadores o ar retorna para dentro do rotor, completando assim o circuito fechado de ventilação.

Para atingir os objetivos e apresentar os resultados será aplicado 5W2H, que servem para notificar atitudes e mentalidades, entendimento e comprometimento, reforços com mecanismos formais. O presente projeto tem como tema “análise de danos internos nos tubos dos trocadores de calor das unidades geradoras da UHE Barra Grande – “análise de causa”. E como objetivo geral é desenvolver um estudo de análise de causa no sistema de resfriamento das Unidades Geradoras onde se encontra se o trocador de calor (radiador) que vem desenvolvendo vazamentos em vários pontos diferentes assim havendo umidade no ar que passa pelas partes acima mencionadas no sistema do gerador das unidades geradoras.

Palavras-chave: Trocador de calor, impurezas do fluído, 5W2H.

¹Acadêmico da 10ª fase do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário - Unifacvest. carnezzellamadu@gmail.com

² Orientador, Docente do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica (Unifacvest). renyhenne@hotmail.com

INTERNAL DAMAGE ANALYSIS IN THE TUBES OF THE HEAT EXCHANGERS OF THE GENERATING UNITS OF BARRA GRANDE

ABSTRACT

The loss of heat in the generator is mostly withdrawn through the air-water heat exchangers. The cooling system of the generator consists of the closed ventilation circuit and the cooling water circuit. In the closed loop ventilation air is sucked through the openings at the top of the rotor spider, the spider arms operate as a radial fan. The air passes through the ventilation channels in the magnetic ring of the rotor, it cools the air gap and winding. Passing through the stator core ventilation ducts, the air cools the core and consequently removes heat from the winding. Part of the air is distributed to the upper and lower winding heads. At the exit of the housing the air passes through the air-water exchangers, where the thermal exchange takes place. Leaving the radiators, the air returns to the rotor, thus completing the closed ventilation circuit.

To achieve the objectives and present the results will be applied 5W2H, which serve to notify attitudes and mentalities, understanding and commitment, reinforcements with formal mechanisms. This project has the theme "analysis of internal damages in the tubes of the heat exchangers of the generating units of the Barra Grande Hydroelectric Power Plant -" cause analysis ". And as a general objective is to develop a study of cause analysis in the cooling system of Generating Units where one is if the heat exchanger (radiator) that has been developing leaks in several different points thus having humidity in the air that passes through the parts mentioned above in the generator system.

Keywords: Heat exchanger, fluid impurities, 5W2H.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Principais dados do gerador.....	25
Tabela 2 Dados do mancal da guia superior.....	26
Tabela 3 Dados dos Refrigeradores Ar-Água.....	26
Tabela 4 Dados dos Elementos de Supervisão e Proteção	27
Tabela 5 Dados sobre o sistema de frenagem e levantamento	27
Tabela 7 Consumo total de água resfriamento da água de força.....	30
Tabela 8 Dados nominares dos filtros	30
Tabela 9 Dimensionamento das Tubulações	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Método Seis Sigma	17
Figura 2 Referências do Sistema Lean Manufacturing	19
Figura 3 Lean Seis Sigma.....	20
Figura 4 Exemplificação do 5W2H.....	20
Figura 6 Representação da Unidade Geradora da UHE Barra Grande.....	28
Figura 7 Esquema de água-resfriamento	32
Figura 8 Trocador de calor após cortes para retirada do tubo comprometido.....	34
Figura 9 Local aonde se localizava os tubos	34
Figura 10 Entrada dos tubos na seção que contém o tubo com problema.....	35
Figura 11 Seção longitudinal no trecho inicial (próximo ao espelho) do tubo com defeito.....	37
Figura 12 Entrada do tubo que apresentou defeito.....	38
Figura 13 Seção longitudinal do tubo com defeito a 100 mm da entrada.....	39
Figura 14 Imagem de microscopia ótica próxima do início do tubo com defeito. 30x aumento.	40
Figura 15 Imagem próxima do início do tubo com defeito, detalhe na região que perdeu material. 30x aumento.....	41
Figura 16 Imagem de MEV de um pite passante, próximo à entrada do tubo com defeito	42
Figura 17 Detalhe das regiões onde foram realizadas análises elementares por EDS	43
Figura 18 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 1 da figura 17.....	44
Figura 19 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 2 da Figura 17.....	44
Figura 20 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 3 da Figura 17.....	45
Figura 21 Imagem de MEV do produto de corrosão próximo a um pite passante, na entrada do tubo com defeito.....	46
Figura 22 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 1.	46
Figura 23 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 5.	47
Figura 24 Imagem de MEV do início do tubo com defeito, detalhe na região que perdeu material.....	48

Figura 25 Análise elementar da área mostrada na Figura 24.	49
Figura 26 Incrustações no interior do tubo.	49
Figura 27 Furo no tubo antes de realizar a parada da unidade geradora conseguimos visualizar o furo no tubo, onde está medindo aproximadamente 1,5mm.....	50
Figura 28 Tamponando o tubo	50
Figura 29 Tubos necessitando de limpeza.....	51
Figura 30 Tubos após a limpeza.....	51
Figura 31 Tubos prontos para serem soldados.	52
Figura 32 Solda sendo realizada.....	53
Figura 33 Executando líquido penetrante.....	53
Figura 34 Furo isolado após testes	54
Figura 35 Aplicando a tinta para não haver corrosão.....	54
Figura 36 Troca do radiador	55

LISTA DE ABREVIATURAS

1. MO- Microscopia ótica;
2. ME- Microscópio estereoscópico;
3. MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura;
4. EDS- Espectroscopia Energia Dispersiva por raio X;
5. RTD- Detector de temperatura de resistência;

LISTA DE SÍMBOLOS

1. T – Temperatura, °C ou K
2. RPM – Rotações por Minuto
3. m^2 - Unidade de Área
4. Massa – Kg
5. Tempo – s
6. Energia – J
7. Força – N
8. Potência – W
9. Pressão – Pa
10. Trabalho – J
11. Volume – m^3
12. Aceleração – m/s^2
13. Velocidade – m/s
14. Calor Trocado – q
15. Vazão Mássica do Fluido Quente– m_q
16. Vazão Mássica do Fluido Frio – m_f
17. Calor Específico do Fluido Quente – C_{p_q}
18. Calor Específico do Fluido Frio – C_{p_f}

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 FATORES ATENUANTES DO DESEMPENHO	13
2.2 MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DO TROCADOR DE CALOR.....	14
2.3 TROCADORES DE CALOR.....	15
2.4 FERRAMENTAS DA QUALIDADE	17
2.4.1 LEAN SEIS SIGMA.....	17
2.4.2 LEAN MANUFACTURING	19
2.4.3 5W2H.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 METODOLOGIA.....	22
3.2 SISTEMA DE RESFRIAMENTO AR-ÁGUA	23
3.3 DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES PRINCIPAIS DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, DE SUPRIMENTO PERMANENTE DE ÁGUA E DESCARGA DAS UNIDADES.	24
3.4 RADIADORES DO GERADOR.....	27
3.5 SISTEMA DE AQUECIMENTO DO GERADOR	29
3.6 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	29
3.7 DIMENSIONAMENTO DOS FILTROS.....	30
3.8 REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	31
3.9 ESQUEMA DO SISTEMA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO	32
3.10 PLANO DE AÇÃO.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	58
ANEXOS	60

1 INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas são responsáveis pela maior parte da geração de energia elétrica no Brasil. A unidade de energia elétrica atualmente utilizada pela ANEEL é o kWh (quilowatt-hora) ou o MWh (megawatt-hora). São unidades usadas para indicar a "potência por unidade de tempo" que uma usina de geração de energia pode produzir em um tempo especificado. Essa produção de energia elétrica pode ocorrer por meio de diversas fontes de geração, dentre elas: termelétricas, eólicas, hidrelétricas, fotovoltaicas, termonucleares etc. Sendo assim a usina Hidrelétrica de Energia (UHE): são aquelas de potencial hidráulico de potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 50.000 kW, em regime de produção independente ou autoprodução, sem características de pequena central hidrelétrica – PCH.

O monitoramento das condições dos equipamentos é imprescindível para garantir a eficiência e funcionamento desejável da unidade geradora hidrelétrica. Para tal fim é utilizado sistemas de monitoramento de condições das máquinas buscando detectar falhas no funcionamento, gerando, assim, dados indispensáveis para operações de manutenção.

Nas plantas industriais das usinas hidrelétricas existe uma variedade de equipamentos responsáveis pela geração da energia, sendo indispensável o pleno funcionamento destes. Esta pesquisa visa a análise nos sistemas de resfriamento das unidades geradoras na qual se encontra o trocador de calor.

Analisando o processo do sistema de resfriamento das unidades geradoras da UHE Barra Grande em Pinhal da Serra, RS. Na unidade geradora onde se encontra os trocadores de calor, evidencia-se vazamento de água nos tubos de cobre destes quando no processo de resfriamento, ocorrendo perdas de energia resultadas pela variação de vazão, pressão ou corrosão.

A identificação dos danos nos tubos dos trocadores de calor é de grande importância, pois estes danos refletem diretamente ao tempo de produção da energia, assim, gerando custos desnecessários de parada além de aumentar o trabalho e custos de manutenção corretiva.

Sendo o objetivo geral desta pesquisa o estudo das possíveis causas responsáveis pelos vazamentos no sistema de resfriamento das unidades geradoras da UHE – Barra Grande, RS, tem-se como objetivos específicos:

A identificação das causas de vazamento nos tubos dos trocadores de calor;

A descrição do processo de resfriamento conforme as normas regulamentadoras utilizadas na empresa;

A análise dos relatórios emitidos pelo instituto LACTEC que é um dos maiores centros de ciência e tecnologia do país, referência em soluções inovadoras para o segundo setor, quanto aos problemas identificados na inspeção.

Utilizando ferramentas do 5W2H, e analisando os relatórios de inspeção coletados pela empresa pode-se, então, otimizar o processo de resfriamento a fim de reduzir as perdas de energia e a necessidade de manutenção das unidades geradoras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FATORES ATENUANTES DO DESEMPENHO

a. Incrustação ou incrustação

A incrustação ocorre quando um fluido passa pelo permutador de calor e as impurezas no fluido precipitam a superfície dos tubos. A precipitação destas impurezas é causada pelo uso freqüente do trocador de calor, a redução da velocidade dos fluidos flui através do trocador de calor e super dimensiona o trocador de calor. Os efeitos de as incrustações são mais evidentes nos tubos frios do trocador que nos tubos quentes. Isso é porque as impurezas são é menos provável que se dissolva em um fluido frio, já que para a maioria das substâncias a solubilidade aumenta com o aumento da temperatura. Apesar parede dura é uma exceção, o inverso é o caso. A incrustação também reduz a área da seção transversal de calor para ser transferido e provoca um aumento na resistência à transferência de calor através do permutador de calor. A térmica a condutividade é reduzida por incrustação. Se o calor global transferir o coeficiente e a eficiência da transferência de calor, reduzido, haverá um aumento nos custos de bombeamento e manutenção. (MADI, 2005).

Asfixia de tubos

Fluxo de gás ou fluxo de fluido pode ser bloqueado na saída do tubo. Isso pode ocorrer na condição transitória em que a bolha de alta pressão de gás ou vórtice fluido é gerada com um momento máximo que forçou o líquido do lado de baixa pressão (LP). Este processo ocorre a pressão máxima no lado LP do permutador de calor e é caracterizado por um processo pseudo-estável que depende da resistência do fluxo. (SHAH; SEKULIC, 2003).

b. Baixa velocidade do tubo

Para a maioria dos fluidos na maioria das aplicações, uma menor velocidade do tubo significa um coeficiente de transferência de calor mais baixo, portanto, a transferência de calor é menos eficaz, então os projetistas térmicos manterão o desempenho mantendo a velocidade

tão alto quanto o material do tubo e queda de pressão não é comprometida. Outros fatores atenuantes do desempenho são taxas de transferência excessivas, falta de sistema de controle efetivo, aquecimento desigual. (SHAH; SEKULIC, 2003).

2.2 MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DO TROCADOR DE CALOR

A crescente complexidade técnica do sistema de engenharia, como o sistema de aquecimento, juntamente com o intenso necessidade de alta segurança e desempenho de tais sistemas. Por conseguinte, é necessário reforçar uma segurança eficaz e sistema de troca de calor viável que atenderá às necessidades da indústria. Um custo generalizado que se arrasta produtividade e desempenho são os equipamentos não planejados e o tempo de inatividade do processo de fabricação. Quando falha já começou, o sistema de monitoramento de condições só pode medir a deterioração da condição (MADI, 2005).

A manutenção adequada e as práticas operacionais podem afetar significativamente o nível de degradação do desempenho e assim tempo entre reparos ou revisão do trocador de calor. Monitoramento pró-ativo permitirá que o calor operador de trocador para tomar decisão de serviço inteligente com base na condição real do trocador de calor do que em um intervalo de manutenção fixo e baseado no calendário. Esse tipo de monitoramento de condições reduzirá ainda mais degradação e deterioração do trocador de calor. Normalmente é mais rentável do que permitir equipamento a falhar. A maquinaria útil inclui o equipamento de giro e a planta estacionária tais como caldeiras e trocadores de calor. (SHAH; SEKULIC, 2003).

O uso do monitoramento de condições permite que a manutenção ou outras ações sejam tomadas para evitar a consequência de falha, antes que a falha ocorra. A manutenção preditiva não prevê apenas ou necessariamente a falha, ela também ajuda a prever o tempo de falha. Uma vez que máquinas como um trocador de calor são colocadas em uso, degradação e deterioração começar. No entanto, é normalmente muito mais rentável medir a deterioração do que permitir a maquinaria a falhar. O objetivo disso é gerar alguns modelos proativos para melhorar a avaliação de desempenho de um trocador de calor de casco e tubo. O método de monitoramento usado para trocadores de calor é tendência de desempenho monitoramento, as tendências elementares são demonstradas por métodos tão simples como relacionar a queda de fluxo direto em um trocador de calor. O acúmulo de depósitos nas linhas de fluxo será revelado pelo aumento na queda de pressão necessário para manter uma certa taxa ou through-put. Foi explicado que a diferença de temperatura em ambos entrada e saída de ambas

as seções quente e fria pode indicar o espessamento de filmes e redução na transferência de calor coeficientes. Acrescentou-se ainda que a presença de monitoramento contínuo não elimina a necessidade de monitoramento. Sistemas de monitoramento contínuo alertam o operador sobre problemas iminentes. O contínuo portanto, o monitoramento é necessário para os trocadores de calor e adotado nesta pesquisa (SCHENKEL, 2015).

Inspeção de integridade de placas e trocador de calor tubular pode ser testada in-situ pela condutividade do hélio método de gás. Estes métodos confirmam a integridade das placas ou tubos para evitar qualquer contaminação cruzada e a condição das juntas. O monitoramento da condição dos tubos do trocador de calor pode ser realizado através de sistemas não destrutivos. métodos como o teste da corrente parasita. (SHAH; SEKULIC, 2003).

2.3 TROCADORES DE CALOR

O processo de troca de calor entre dois fluídos que estão a diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida ocorre em muitas aplicações de engenharia. O equipamento usado para implementar essa troca é conhecido por Trocador de Calor, e suas aplicações específicas podem ser encontradas no aquecimento de ambientes e no condicionamento de ar, na produção de potência, na recuperação de calor em processos e no processamento químico.

Neste capítulo nossos objetivos são apresentar os parâmetros de desempenho para avaliar eficácia de um trocador de calor e desenvolver metodologias para projetar um trocador de calor ou para prever o desempenho de um trocador existente operando sob condições especificadas (INCROPERA, BERGMAN, DEWITT, 2008).

Tipos de Trocadores de Calor

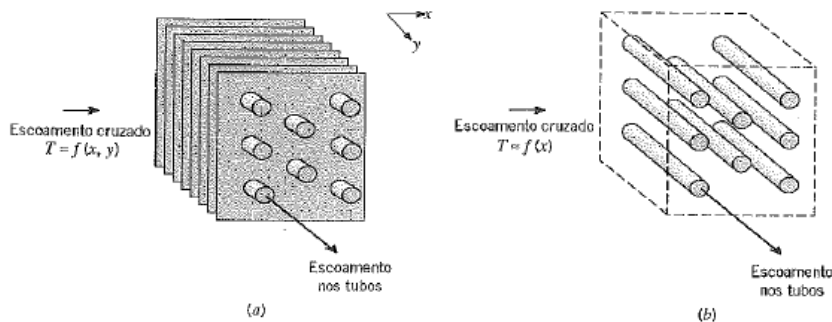
Os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. No trocador de calor mais simples, os fluídos quentes e frios se movem no mesmo sentido ou em sentidos opostos em uma construção com tubos concêntricos (ou bi tubular).

As duas configurações são tipicamente diferenciadas por uma idealização que trata o escoamento do fluído sobre os tubos como misturados e não misturados. Na figura (a), diz se que o fluído está não misturado, pois as aletas impedem o movimento na direção (y) que é transversal a direção (x) do escoamento principal. Nesse caso, a temperatura do fluído varia com x e y. Ao contrário para o feixe tubular não-aletado da figura (b), o movimento do fluído,

e conseqüentemente sua mistura na direção transversal, é possível e a variação de temperatura ocorre principalmente na direção do escoamento principal. Como o escoamento no interior dos tubos é não-misturado, em trocadores aletados os dois fluídos são não misturados, enquanto em trocadores não aletados um fluído é misturado e o outro não. A natureza da condição de mistura pode influenciar significativamente o desempenho do trocador de calor.

Outra configuração comum é o trocador de calor casco tubo. Formas específicas desse tipo de trocador de calor diferem de acordo com os números de passes nos cascos tubos.

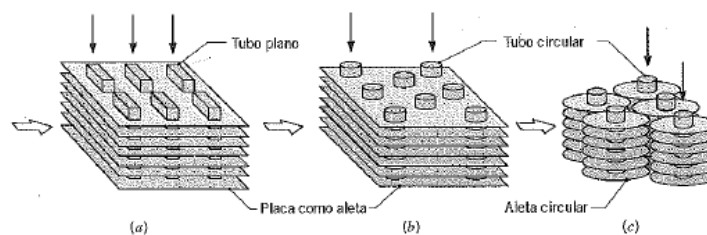
Trocadores de Calor com Escoamentos Cruzados, (a) Aletado com ambos os Fluídos Não-Misturados, (b) Não-aletado com um Fluído misturado e o outro Não-Misturado.



Fonte: INCROPERA, BERGMAN, DEWITT, 2008.

Os tubos podem ser planos ou circulares, como nas Figuras a e b, c, respectivamente, e as aletas podem ser planas ou circulares, como nas Figuras a,b, respectivamente. Trocadores de calor com placas paralelas podem ser aletados ou corrugados, e podem ser utilizados com modos de operação de um único passe (Figura d) ou com múltiplos passes (Figura e). As seções de escoamento associados aos trocadores de calor compactos são tipicamente pequenas ($D \leq 5\text{mm}$), e o escoamento é geralmente laminar.

Núcleos de trocadores de calor (a) Tubo aletado (tubos planos, placas contínuas como aletas). (b) Tubos aletados (tubos circulares, placas contínuas como aletas). (c) Tubo aletado (tubos circulares, aletados circulares). (d) Placa aletada (passe único), (e) Placa aletada (múltiplo passe)



Fonte: INCROPERA, BERGMAN, DEWITT, 2008.

2.4 FERRAMENTAS DA QUALIDADE

A competição em busca do cliente tem levado as empresas a buscar formas de aprimorar a eficiência de suas operações e a qualidade de seus produtos e serviços. Eficiência e qualidade são termos relacionados. Algumas ferramentas de qualidade são utilizadas para o aprimoramento dos processos.

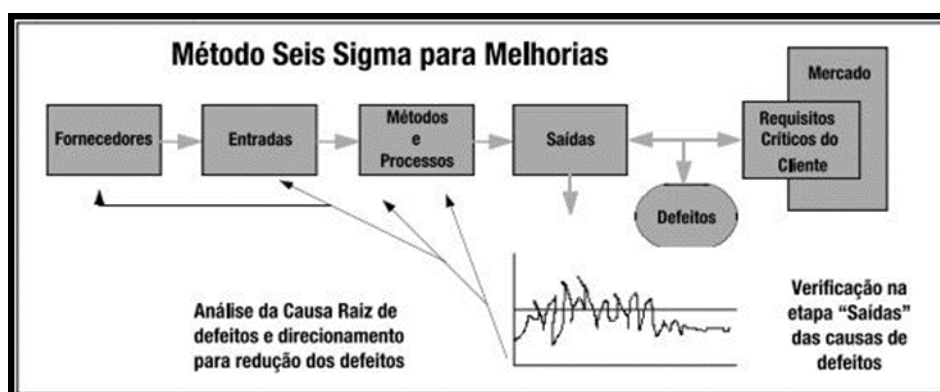
2.4.1 LEAN SEIS SIGMA

É uma estratégia gerencial desenvolvida na organização Motorola em 1987 qual foi notabilizada pela GE (General Electric), a partir de divulgação feita com destaque pelo CEO Jack Welch, dos expressivos resultados financeiros obtidos pela empresa através da implantação da metodologia, com ganhos de 1,5 bilhão de dólares em 1999 (BALTAZAR, 2015).

Disciplinada e altamente quantitativa, esta ferramenta tem como objetivo aumentar expressivamente o desempenho e a lucratividade das empresas, por meio da melhoria da qualidade de produtos e processos e do aumento da satisfação de clientes e consumidores.

Segundo Halliday (2001), qualquer iniciativa de sucesso para o aperfeiçoamento da qualidade, como o Seis Sigma (Figura 1), requer forte devoção da alta administração e alocação apropriada de recursos e treinamentos.

Figura 1 Método Seis Sigma



Fonte: ANDRIETTA; MIGUEL (2007)

Seis Sigma não é uma ferramenta de qualidade no sentido clássico, em que se buscam padrões de tolerância e conformidade pré-estabelecidos. É muito mais do que isso, pois, ao passo que pretende reduzir os erros a uma taxa ínfima (3,4 defeitos por milhão de possibilidades), quer fundamentar o conceito de qualidade como valor agregado de um conjunto de ações coletivas, visando essencialmente a geração de lucro para a empresa pela redução do hiato entre qualidade potencial e qualidade efetiva (BALTAZAR, 2015).

Rotondaro (2002) complementa afirmando que “a meta do Seis Sigma não é alcançar níveis Seis Sigma de qualidade. Ele está relacionado à melhoria da lucratividade. Organizações que implementam Seis Sigma fazem isso com a meta de melhorar seus lucros”.

As principais vantagens da implantação do programa são relativas ao alcance de novos e elevados patamares de qualidade de produtos e prestação de serviços, os quais se tornam mais baratos e eficientes, realizados em ciclos de tempo menor e gerando satisfação aos consumidores, o que estabelece diferenciais competitivos reais em relação à concorrência (BALTAZAR, 2015).

Embora algo complexo de início, por envolver modos de pensar e formas de agir, os resultados da implantação do programa 6S são altamente compensadores, podendo-se relacionar como principais benefícios:

- Redução de custos por conta da má gestão de qualidade de produtos e serviços.
- Maiores e melhores resultados financeiros, pela desoneração de procedimentos não agregadores de valor, dentro da organização.
- Amplo envolvimento das pessoas, bem como reflexos diretos em produtividade, pelo melhor e mais direcionado grau de preparação e treinamento necessários à gestão do sistema.
- Fortalecimento da marca, por conta da confiabilidade criada em torno dela;
- Valorização dos investimentos efetuados, através de retorno muito mais rápido (LIKER; MEIER, 2007).

Grande parte das empresas chegam ao final do primeiro ano de implantação dos 6S empatando os investimentos realizados com os ganhos auferidos. A maior parte já obtém ganhos permanentes no segundo ano. Em empresas onde o 6S já está “maduro”, a incorporação positiva de ganho às margens de lucro pode ser equivalente a um aumento de vendas entre 10% e 15% (ANDRIETTA; MIGUEL, 2007).

Cabe ressaltar dois fatores favorecem o fracasso da implantação do método Seis Sigma: o primeiro é quando a empresa encara o método como uma série de projetos, pois é um grave erro entender o Seis Sigma como um projeto. Na verdade, os projetos devem ser compreendidos como uma alavanca tática para um programa Seis Sigma, mas muito mais importante é o enfoque sobre a gestão do processo e a prática de uma disciplina rigorosa em todas as etapas dos processos (BALTAZAR, 2015).

O segundo fator de fracasso é o descaso da liderança da empresa, que deve estar comprometida ativamente com todas as etapas da implantação e condução do método, e não apenas com a alocação de recursos para o programa (BALTAZAR, 2015).

2.4.2 LEAN MANUFACTURING

É uma iniciativa que busca eliminar desperdícios, isto é, excluir o que não tem valor para o cliente e imprimir velocidade à empresa. Pode ser aplicado em todo tipo de trabalho.

As origens do *Lean Manufacturing* remontam ao sistema Toyota de Produção (também conhecido como Produção *Just-in-Time*) e em seu cerne está a redução de sete tipos de desperdícios: defeitos (nos produtos), produção de mercadorias desnecessárias, estoques de mercadorias à espera de processamento ou consumo, processamento desnecessário, movimento desnecessário (de pessoas), transporte desnecessário (de mercadorias) e espera (dos funcionários pelo equipamento de processamento para finalizar o trabalho ou por uma atividade anterior) (DEMING, 1990).

Figura 2 Referências do Sistema Lean Manufacturing



Fonte: BALTAZAR, 2015

O programa consequente da integração entre o Seis Sigma e o Lean Manufacturing, por meio da incorporação dos pontos fortes de cada um deles é denominado Lean Seis Sigma uma estratégia mais abrangente, poderosa e eficaz que cada uma das partes individualmente,

amoldada à solução de todos os tipos de problemas relacionados à melhoria de processos e produtos.

Figura 3 Lean Seis Sigma



Fonte: BALTAZAR, 2015.

2.4.3 METODOLOGIA 5W2H

O 5W2H é uma metodologia para a elaboração de planos de ação, uma ferramenta que tem como objetivo eliminar ruídos na comunicação, gerar melhor qualidade na execução de tarefas, além de validar ações (Kimberly-Clark, 2014). 5W2H é abreviação de:

- **What** – O que será feito (etapas);
- **Why** – Por que será feito (justificativa);
- **Where** – Onde será feito (local);
- **When** – Quando será feito (tempo);
- **Who** – Por quem será feito (responsabilidade);
- **How** – Como será feito (método);
- **How much** – Quanto custará para ser feito (custo).

Figura 4 Exemplificação do 5W2H

O que (What)	Quem (Who)	Onde (Where)	Por que (why)	Quando (when)	Como (how)	Quanto (How much)
Ler 1 livro em 60 dias	Eu/auxilio professor	Casa / Biblioteca	Ampliar conhecimen. profissionais. pessoais.	03 horas Sábado, 02 h domingo.	Buscar isolamento 40h x12pg 480 pg/60d	R\$ 20,00 Deslocam. cópias
Elaborar Check List das tarefas	Secretária (Nome)	Área Administrativa	Para evitar futuros atrasos	Em uma semana	Utilizando uma planilha Excel	Sem custo

Fonte: Kimberly-Clark, 2014.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

O estudo será realizado por meio de análises de causa realizadas na empresa BAESA – Energética Barra Grande S/A. Evidenciou-se na empresa, a necessidade de análise dentro do processo de resfriamento das unidades geradoras, principalmente nos tubos de troca de calor onde se apresentam vazamentos.

“A Análise de Causa Raiz é uma metodologia que demonstra ser imprescindível para qualquer organização, especialmente porque necessita eliminar a reincidência de falhas para sair do modo reativo” (BAPTISTA, 2007)

Para tanto, a identificação das causas é a principal etapa para prosseguir no estudo e na resolução do problema encontrado, visando sempre a busca pela qualificação do processo de trabalho e resultados finais dentro dos objetivos traçados.

No desenvolvimento dos estudos juntamente com a empresa CPFL Geração, que como proprietária, também adquire os trabalhos de suporte na área de Engenharia da Usina Hidrelétrica Barra Grande, foi decidido a utilização da metodologia 5W2H para identificação do que está ocorrendo para causar o problema.

What – Primeiramente deve ser revisto o manual do sistema, seguido do levantamento dos históricos do equipamento quanto as manutenções preditivos/preventivos e manutenções corretivas.

Who – Esta atividade descrita em What deve ser executada por uma comissão composta de 4 a 6 funcionários

Where – Este trabalho irá se iniciar internamente nas dependências da Usina Hidrelétrica Barra Grande, onde os primeiros passos para o estudo será o levantamento de dados, e posteriormente, será trabalhado com o auxílio de laboratório especializado (LACTEC) onde já foi contatado via telefone para troca de informações para retirar os dados com o auxílio de microscópio onde será estudado as áreas dos tubos no trocador de calor onde está ocorrendo o desvio.

Why – Este trabalho se realizará para sanar os danos ao equipamento em um contexto geral das unidades geradoras, pois várias outras etapas do processo dependem do sistema de resfriamento, e levando em consideração que a área onde está ocorrendo este problema caso venha a se agravar ficará muito perigoso as inspeções realizadas pelos operadores e técnicos

da manutenção mecânica e elétrica quando se faz necessário, por exemplo manutenção preditiva/preventiva mensal do gerador.

When – Após a realização dos estudos e a obtenção dos laudos do laboratório, confrontar os documentos para avaliar qual será a medida a ser tomada.

How – Já analisado para a realização da troca de seis trocadores de calor (radiador), na parada da unidade geradora, para o próximo ano 2019.

How much – Nesta fase será levantado todos os gastos para realização da troca dos trocadores de calor como por exemplo:

1. Custo na fabricação de cada trocador de calor;
2. Custo com materiais adicionais a serem usados;
3. Equipe necessária para realizar a troca do equipamento.

3.2 SISTEMA DE RESFRIAMENTO AR-ÁGUA

O calor gerado pelas perdas no gerador é retirado, na sua maior parte, através dos trocadores de calor ar-água. O sistema de resfriamento do gerador é constituído pelo circuito fechado de ventilação e pelo circuito de água de resfriamento. No circuito fechado de ventilação o ar é succionado pelas aberturas na parte superior da aranha do rotor. Os braços da aranha operam como um ventilador radial. O ar passa pelos canais de ventilação no anel magnético do rotor, resfria a região do entreferro e enrolamento polar. Passando pelos dutos de ventilação do núcleo estatórico, o ar resfria o núcleo e conseqüentemente retira calor do enrolamento. Parte do ar se distribui para as cabeças superiores e inferiores do enrolamento. Na saída da carcaça o ar passa pelos trocadores de calor ar-água, onde se processa a troca térmica. Saindo dos resfriadores o ar retorna para dentro do rotor, completando assim o circuito fechado de ventilação. Como elementos de medição de temperatura no circuito de ar, existem detectores à resistência (RTD Pt 100) instalados internamente antes dos resfriadores (medição do ar quente) e detectores à resistência (RTD Pt 100) instalados externamente na frente dos resfriadores (medição do ar frio). O circuito de água de resfriamento é aberto, isto é, após passagem pelos resfriadores a água de resfriamento é eliminada no nível jusante. Os trocadores de calor são montados diretamente sobre as aberturas na carcaça, o trocador é composto, em linhas gerais, de duas câmaras de água, contendo os espelhos que são acoplados a um feixe de tubos aletados de resfriamento. Essas aletas aumentam consideravelmente a área de troca térmica entre o ar quente e a água que circula pelos tubos.

O sistema de resfriamento ar-água é composto das seguintes partes:

- Tubulação geral de entrada de água, derivando nas tubulações individuais para cada trocador de calor;
- Tubulação geral de saída de água, que coleta a água de cada trocador de calor;
- Fluxostato, na tubulação geral de saída de água do gerador;
- Válvula de respiro de cada trocador de calor;
- Válvula de drenagem de cada trocador de calor;
- Tubulação de drenagem de cada trocador;
- Válvulas de isolamento e controle de fluxo, individualmente na tubulação de entrada e saída de cada trocador de calor;

Cápsulas para termômetros tipo bulbo na tubulação de entrada e saída de cada trocador, e na tubulação geral de entrada e saída. O circuito de água de resfriamento é aberto, sua tomada de água ocorre no conduto forçado passando pelo filtro autolimpante FAAR com uma pressão em torno de 15 bar. Após o filtro, a água entra em um coletor principal e se divide em alimentação de água de resfriamento para as três unidades geradoras. A alimentação do coletor principal em situação normal pode ocorrer com somente dois filtros autolimpante alimentando a refrigeração das três unidades geradoras. (Baesa.Manual Interno de Operação). A pressão de água do circuito de resfriamento é ajustada pela válvula redutora de pressão monovar para trabalhar em torno de 7,6 a 8,2 bar. O sistema de resfriamento tem como proteção contra sobre pressão de água na saída da monovar uma válvula de alívio cujo ajuste está em 8,8 bar para que a sobre pressão de água não danifique os trocadores de calor e conexões dentro do poço do gerador.

(Fonte: Baesa.Manual Interno).

3.3 DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES PRINCIPAIS DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, DE SUPRIMENTO PERMANENTE DE ÁGUA E DESCARGA DAS UNIDADES.

Tubulação Principal de Água de resfriamento (DN 20”).

A vazão de uma unidade é variável de 898 m³/h a 919 m³/h (com ou sem alimentação dos anéis de desgaste);

A vazão de três unidades (incluindo água de incêndio dos trafos) é de 3.093,50 m³/h;

Caso ocorra o evento de duas unidades terem que abastecer as três unidades da Usina, a tubulação principal de água de resfriamento (pressão plena), diâmetro nominal de DN 20”, terá uma vazão máxima de $\approx 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ ($500\text{m}^3/\text{h}$ de cada unidade) com uma velocidade de 1,5 m/s.

Tubulação de Suprimento Permanente de Água de Resfriamento (DN 6”)

A tubulação de suprimento permanente de água de resfriamento é dimensionada para a vazão máxima de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ provenientes dos condensadores das unidades condicionadoras de ar, dos compressores de ar comprimido de serviço, dos compressores de ar comprimido de rebaixamento, da água para o sistema de água de serviço e dos hidrantes (risco classe A – 2 mangueiras em funcionamento).

Para o DN 6” e uma vazão (máxima) de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ terá uma velocidade de $\approx 1,2 \text{ m/s}$.

Coletor de Descarga da Unidade (DN 16”)

O coletor de descarga de cada unidade é dimensionado para a vazão de $898 \text{ m}^3/\text{h}$ provenientes dos resfriadores de ar do gerador, do mancal guia do gerador, mancal guia da turbina, mancal combinado e do reservatório de óleo regulador.

Para o DN 16” e uma vazão (máxima) de $898 \text{ m}^3/\text{h}$ temos uma velocidade de $\approx 2 \text{ m/s}$.

O gerador é uma máquina síncrona de polos salientes, eixo vertical. Possui um mancal de guia, montado na cruzeta superior, acima do rotor. O cubo do rotor está diretamente acoplado ao eixo da turbina. A cruzeta superior está apoiada na carcaça do estator e ancorada no concreto do *housing*.

O gerador é provido de um sistema de auto ventilação do tipo radial. Trocadores de calor ar-água resfriam o ar que circula em circuito fechado.

Segue algumas tabelas referentes ao gerador utilizado na UHE Barra Grande.

Tabela 1 Principais dados do gerador

Gerador tipo	SAV 740/235/36
Tipo construtivo	W1
Tipo de proteção	IP44
Tipo de resfriamento	ICW37A81
Potência nominal	245.000 kVA
Tensão nominal	16.000 V \pm 5%

Corrente nominal	8.841 A
Fator de potência	0,95
Frequência nominal	60 Hz
Número de fases	3
Sentido de rotação do rotor, visto do LNA	anti-horário
Número de polos	36
Rotação nominal	200 RPM
Rotação de disparo	395 RPM
Tipo de excitação	Estática
Efeito de inércia do gerador (GD2)	14800 Tm ²
Elevação de temperatura do enrolamento do estator	80° C
Elevação de temperatura do enrolamento do rotor	80° C
Classe de isolamento do estator / rotor	F
Tipo do enrolamento do estator	Barra Roebel
Corrente de excitação nominal	1930 A
Tensão de excitação nominal	280 V

Fonte: Manual Interno Baesa.

Tabela 2 Dados do mancal da guia superior

Mancal de guia superior	
Número de segmentos	12
Folga radial	0,3 mm
Tipo de óleo	ISO VG68
Vazão de óleo no mancal	13,2 m ³ /h
Vazão de água de resfriamento	28,2 m ³ /h

Fonte: Manual Interno Baesa.

Tabela 3 Dados dos Refrigeradores Ar-Água

Refrigeradores ar-água	
Quantidade	6
Vazão total de água	670,2 m ³ /h
Pressão de trabalho	800 KPa
Pressão de teste hidrostático	1200 KPa

Fonte: Manual Interno Baesa.

Tabela 4 Dados dos Elementos de Supervisão e Proteção

Elementos e instrumentos de supervisão e proteção	
RTD para o núcleo do estator	16
RTD para o enrolamento do estator	48
Sistema de refrigeração ar-água (Trocadores de calor + sistema)	1EHE152756 (BGR-DU2A-CFE11-0058)
Sistema de lubrificação (Mancal guia superior + Skid)	1EHE152758 (BGR-DU2A-CFE11-0060)

Fonte: Manual Interno Baesa.

Tabela 5 Dados sobre o sistema de frenagem e levantamento

Sistema de frenagem e levantamento	
Número de macacos	6
Pressão de ar de frenagem	700 KPa
Velocidade de aplicação da frenagem	30% da rotação nominal
Limite de desgaste da lona de freio	14 mm
Pressão de levantamento do rotor	21000 KPa
Tipo de óleo para pressão de levantamento	ISO VG68
Limite de levantamento do rotor	20 mm

Fonte: Manual Interno Baesa.

3.4 RADIADORES DO GERADOR

A refrigeração dos geradores é feita por um sistema ar/água através de 6 radiadores instalados na sala do gerador. Em cada radiador existe um registro de entrada e um de saída de água que devem permanecer normalmente abertos. Em caso de vazamento no radiador, estes registros devem ser fechados, até que o problema seja corrigido.

Durante o período em que permanecerem fechados deve-se dar mais atenção ao acompanhamento da temperatura do gerador.

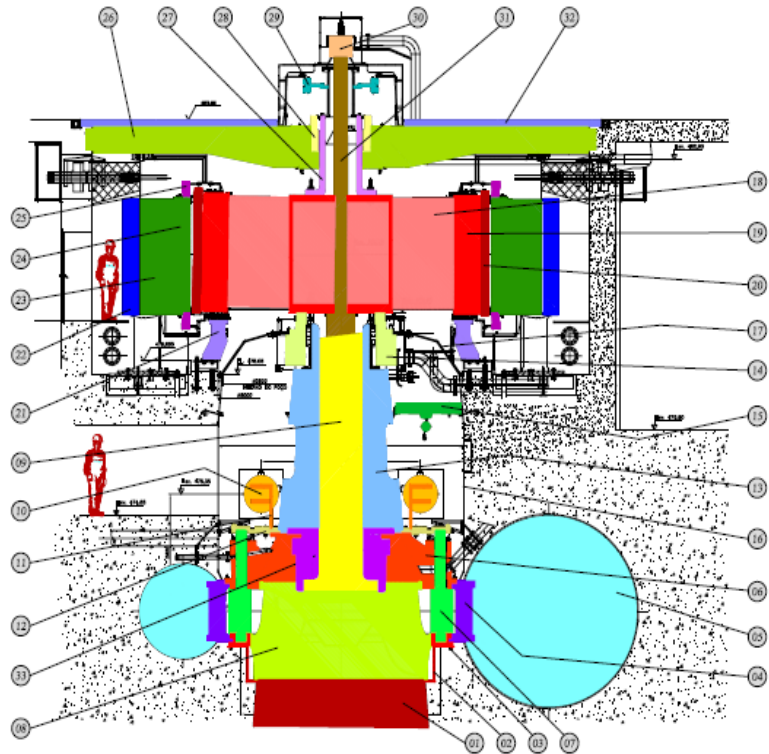
Em cada radiador existe um registro para drenagem de água para possibilitar a manutenção nos mesmos.

Na alimentação da tubulação de água há uma válvula com acionamento manual, normalmente aberta, que isola os radiadores para manutenção. A água de saída dos radiadores é jorrada no canal de fuga através de uma tubulação de (12”).

Figura 5 Representação da Unidade Geradora da UHE Barra Grande.

Potência Nominal	236MW
Nível Montante Máximo	648,13m
Nível Montante Nominal	647,00m
Nível Montante Mínimo	617,00m
Nível Jusante Máximo	501,50m
Nível Jusante Nominal	480,10m
Nível Jusante Mínimo	479,50m
Vazão Nominal	185,00m ³ /s
Rotação Nominal da Turbina	200 rpm
Sobressalente Máxima	395 rpm
Sentido de Rotação: Anti-Incêndio, visto do Gerador	

Fonte: Manual Interno Baesa.



UHE - BARRA GRANDE

Fonte: Desenho Técnico da Unidade Geradora de Barra Grande.

Fonte: Manual Interno Baesa.

LEGENDA					
01	Tubo de sucção	26,80T	18	Aranha do Rotor	40,00T
02	Tampa Inferior	12,00T	19	Núcleo do Rotor	245,00T
03	Caixa de Drenagem	1,20T	20	Polos (36 pç)	108,00T
04	Pré-Distribuidor	49,00T	21	Sistema Frenagem	19,20T
05	Caixa Espiral	176,50T	22	Radiadores	12,00T
06	Tampa Superior	49,30T	23	Carcaça Estator	60,00T
07	Palhetas Diretrizes (24 pç)	28,00T	24	Núcleo do Estator	126,50T
08	Rotor da Turbina (Roda)	38,90T	25	Bobinagem	46,50T
09	Eixo da Turbina	37,00T	26	Cruzeta Superior	17,00T
10	Servomotor (02 pç)	4,40T	27	Eixo Superior	10,00T
11	Aro de Regulação	18,00T	28	MGG	33,00T
12	Bielas e Alavancas (24 pç)	5,00T	29	Anel Coletor	4,00T
13	Cone Suporte	15,00T	30	Sistema Aeração	18,00T
14	Mancal Combinado	21,20T	31	Tubo de Aeração	3,00T
15	Monovia do Poço Turbina	0,50T	32	Plataforma Sup	27,00T
16	Revestimento Poço Turbina	23,00T	33	MGT	13,15T
17	Fechamento Poço Turbina	4,00T			

Fonte: Manual Interno Baesa.

3.5 SISTEMA DE AQUECIMENTO DO GERADOR

Aquecedores instalados dentro do gerador previnem a condensação de vapor de água durante os períodos de parada do gerador. Este sistema de aquecimento é constituído de resistências elétricas instaladas internamente, abaixo do núcleo do estator.

Quando o gerador está parado, o sistema de aquecimento evita que a temperatura interna da máquina fique próxima da temperatura ambiente, prevenindo assim a condensação da umidade. Este sistema de aquecimento é controlado automaticamente, por acionamento através de termostatos e comando quando a unidade geradora estiver parada.

(Fonte: Manual Interno Baesa)

3.6 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Em operação normal todas as válvulas de comando manual do circuito de água de resfriamento devem estar abertas, com exceção das válvulas de dreno e de *by-pass*.

Os três filtros de água bruta devem estar em operação, devendo estar abertos os registros de entrada de água bruta e saída de água filtrada. O filtro autolimpante deve operar normalmente em automático, no caso de anormalidade que impeça o automatismo, poderá ser operado em manual. O sistema de água de refrigeração pode ser mantido com apenas dois filtros, possibilitando a manutenção em um filtro. Em caso de anormalidade haverá sinalização específica no painel local, QFAAR, e uma indicação de falha no console de operação da sala de comando central. Nesta situação o operador da sala de comando central deverá consultar a lista de eventos para tomar as medidas necessárias. (Fonte: Manual Interno Baesa)

A partida de uma Unidade Geradora implica nas aberturas da Válvula Redutora de pressão e a Motorizada (VVAR-101 e VVAR-102), normalizando o circuito de água de refrigeração da unidade. A tubulação principal e a de suprimento permanente de água de refrigeração estarão continuamente supridas, mantendo as alimentações de água no sistema anti-incêndio, sistema de água serviço, sistema de hidrantes, refrigeração dos compressores, etc. O SDSC além de controlar as válvulas sequenciais de partida, VVAR-101 e VVAR-102, supervisiona a operação dos filtros (retro lavagem), as válvulas redutoras de pressão para suprimento permanente de água (VVAR-109, 209 e 309) e as válvulas de alívio (VVAR-110, 210 e 310).

Fonte: Manual Interno Baesa.

3.7 DIMENSIONAMENTO DOS FILTROS

A capacidade dos filtros de água de resfriamento está dimensionada em função do consumo de água no sistema, de maneira que dois dos três filtros sejam capazes de atender a demanda de toda Casa de Força. A tabela 7 apresenta as vazões requeridas pelos locais de consumo

Tabela 6 Consumo total de água resfriamento da água de força

Locais de consumo	Quant.	Unitário	Total
		m ³ /h	m ³ /h
Suprimento para resfriadores de ar do gerador	3	670,2 (a)	2010,6
Mancal guia do gerador	3	15 (c)	45
Mancal combinado	3	181 (b)	543
Regulador da turbina	3	18 (b)	54
Mancal guia da turbina	3	14 (d)	42
Anel de desgaste superior	3	7 (b)	21
Anel de desgaste inferior	3	7 (b)	21
Vedação do eixo da turbina	3	10,8 (b)	32,4
Água de serviço (inclui suprimento para ETA)	-x-	-x-	22
Água de proteção contra incêndio em 1 trafo principal)	-x-	-x-	275
Condensadores das unidades condicionadoras de ar	-x-	-x-	15,5
Compressores sistema de ar comprimido de serviço	2	1,5	3
Compressores sistema de ar comprimido de rebaixamento	3	3	9
TOTAL GERAL		3093,5	

Fonte: Manual Interno Baesa.

Conforme critério tem-se que a capacidade aproximada dos filtros de água de resfriamento deveria ser de 1.534,75 m³/h, sendo adotada a “Capacidade Nominal” de 1600 m³/h.

Tabela 7 Dados nominares dos filtros

Vazão nominal	1600 m ³ /h (0,45 m ³ /s)
Vazão máxima	2000 m ³ /h (0,56 m ³ /s)
Pressões de serviço nominal	1710 kPa
Pressões máxima - golpe de aríete	2540 kPa
Pressão de projeto	2300 kPa
Diâmetro de entrada/saída d'água	18” (máx.).

Fonte: Manual Interno Baesa.

3.8 REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A rede de distribuição está dimensionada em função da vazão requerida pelos equipamentos e sistemas de modo que a velocidade nas tubulações fique compreendida entre $\approx 1,0$ m/s e 3,0 m/s. A ajustagem da vazão é feita por intermédio de medidor de vazão (orifício calibrado ou outros sistemas) e válvula globo situada a montante de cada equipamento. A tabela 2 apresenta o dimensionamento das principais tubulações pertencentes ao Sistema de Água de Resfriamento.

Tabela 8 Dimensionamento das Tubulações

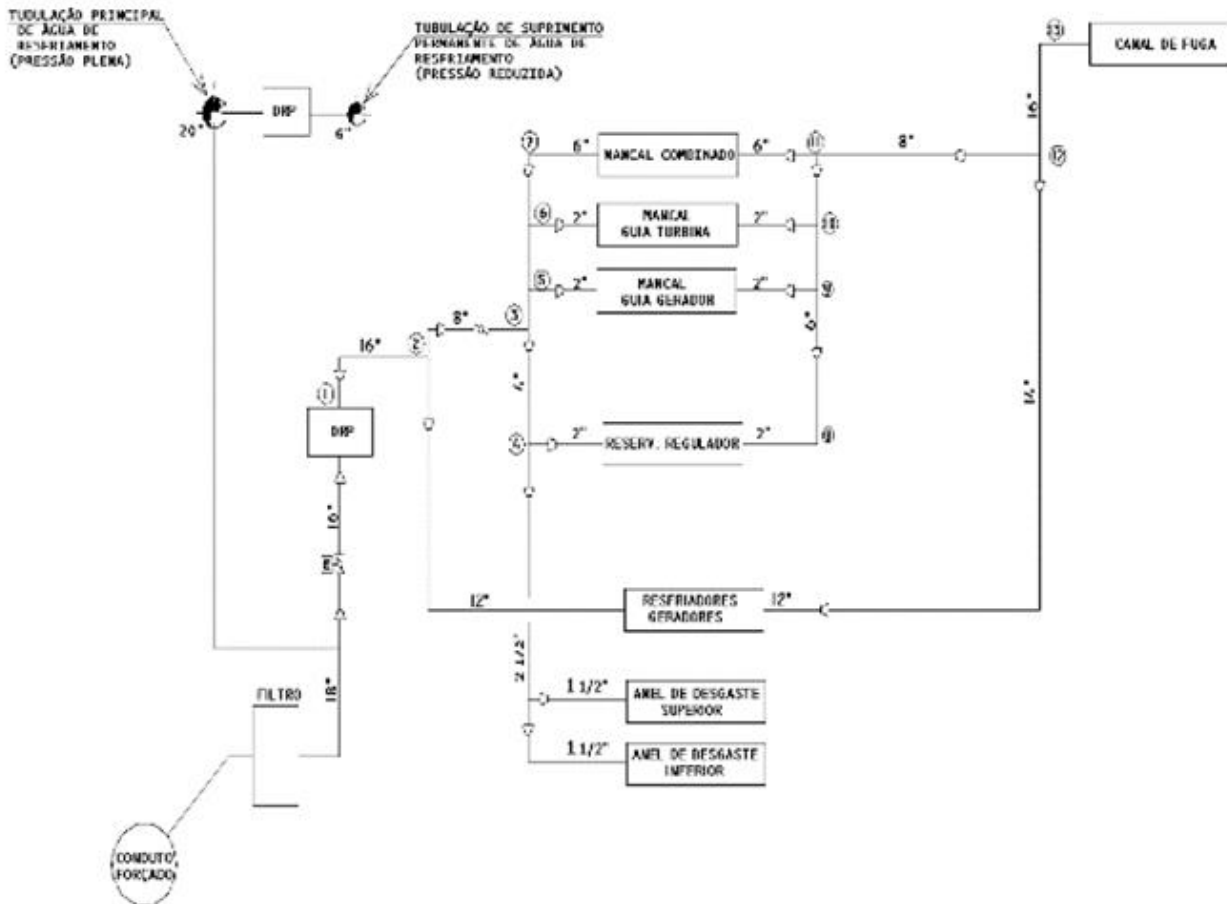
Tubulação de resfriamento	Vazão de projeto [m ³ /h]	Diâmetro [""] [mm]	Velocidade [m/s]
1. Resfriadores de ar do gerador	670	12" (300)	2,5
2. Mancal guia do gerador	15	2" (50)	2,0
3. Mancal combinado	181	6" (150)	2,7
4. Regulador da turbina	18	2" (50)	2,2
5. Mancal guia da turbina	14	2" (50)	1,8
6. Anel de desgaste superior	7	1 1/2" (40)	1,9
7. Anel de desgaste inferior	7	1 1/2" (40)	1,9
8. Anéis de desgaste (linha comum)	14	2 1/2" (65)	1,1
9. Vedação do eixo da turbina	10,8	2" (50)	1,3
10. Água de serviço	20	3" (75)	1,2
11. Proteção contra incêndio (transformadores)	275	8" (250)	2,1
12. Proteção contra incêndio (hidrantes)	30	3" (75)	1,8
13. Ar condicionado (sala controle local U1)	3,5	1 1/2" (40)	1,0
14. Ar condicionado (salas de controle U2/U3)	4,5	1 1/2" (40)	1,3
15. Ar condicionado (sala controle central)	7,5	2" (50)	1,0
16. Compressores do sistema de ar comprimido de serviço	(2 x 1,5) = 3	1" (25)	1,8
17. Compressores do sistema de ar de rebaixamento	(3 x 3) = 9	2" (50)	1,1
18. Tubulação de suprimento permanente de água de resfriamento	112	6" (150)	1,7
19. Tubulação principal de água de resfriamento	1000	20" (500)	1,5

Fonte: Manual Interno Baesa.

3.9 ESQUEMA DO SISTEMA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Com base no fluxograma do sistema de água de resfriamento foi elaborado um esquema simplificado do mesmo, conforme segue, onde foram definidos os trechos para os cálculos de vazões e perdas de carga.

Figura 6 Esquema de água-resfriamento



Fonte: Manual Interno Baesa.

3.10 PLANO DE AÇÃO

Após o estudo do processo e com as causas que afetam a performance já descoberta, aumentando sua variabilidade ou impedindo que este atinja os requisitos, precisa elencar as ações que serão tomadas para eliminar estas causas e com isso, obter a melhoria do processo.

Nesta etapa, um documento extremamente importante é o plano de ação. Neste documento estarão contidas as ações definidas pelo grupo que estudou o processo, os responsáveis por cada ação, a data prevista para a conclusão das ações e o status das mesmas, para que se possa fazer um registro e acompanhamento de tudo que está sendo feito para alcançar as metas do projeto.

É fato que na indústria, o desperdício de qualquer tipo de insumo ou energia num determinado processo será embutida no custo de produção. E é muito provável que os desperdícios globais de toda a companhia estejam sendo distribuídos no custo de produção de todos os seus produtos, prejudicando a rentabilidade, distribuindo as perdas de processos de baixa eficiência e mascarando os resultados de processos de performance mais elevada, ser lucrativa e produtiva, no cenário atual, precisa mais que apenas produzir com qualidade e baixo custo.

Com o presente projeto de estudo de caso será possível conhecer melhor o processo, em busca de vazamentos de ar e fluidos e desperdícios de tempo de máquina parada, aumentando o custo da produção.

No presente estudo o principal propósito, será de atender o objetivo geral e os específicos, visando a eficiência na manutenção no sistema de trocador de calor (radiador), com a redução de tempo de máquina parada em todos os processos da Hidrelétrica através da aplicação do 5W2H é uma metodologia para a elaboração de planos de ação e não será implementado a metodologia Lean Seis Sigma e DMAIC para o desenvolver deste projeto.

Para finalizar, observa-se no Projeto exemplos do que será trabalhado no Relatório final do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário - UNIFACVEST, que mostram as Figura 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 de localização de vazamento em tubos que transportam o fluídos dos trocadores de calor (radiadores) e as tarefas em conjunto de bloquear a passagem de água pelos tubos onde encontrou se vazamentos em uma unidade geradora de uma usina elétrica da região serrana de Santa Catarina UHE Barra Grande.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

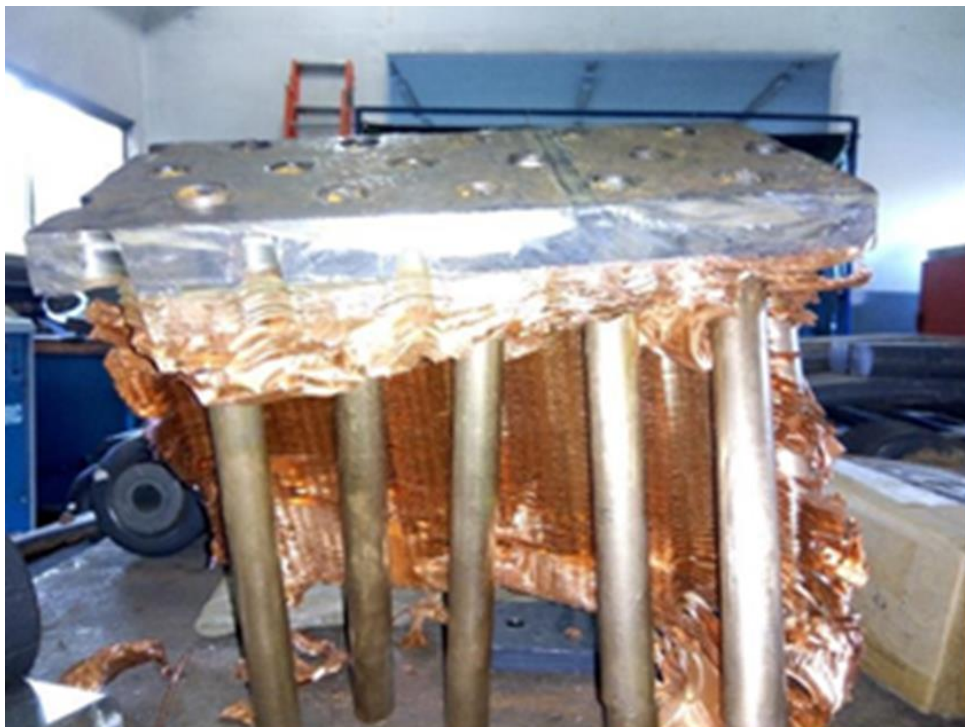
O tubo com vazamento foi encontrado utilizando gás comprimido. Para sua retirada, foi necessário serrar uma seção do espelho e dos tubos. A posição do corte nos tubos foi feita a cerca de 40 cm do ponto onde foi verificado o vazamento (próximo à entrada do tubo).

Figura 7 Trocador de calor após cortes para retirada do tubo comprometido.



Fonte: Baesa Energética Barra Grande, 2018.

Figura 8 Local aonde se localizava os tubos



Fonte: O Autor, 2018.

Além do tubo com vazamento, tubos supostamente sem problemas também foram retirados para avaliação comparativa.

Procedimentos para análise dos tubos:

- Análise visual e registro fotográfico.
- Segundo procedimento interno do LACTEC.
- Microscopia ótica
- Segundo procedimento interno Lactec.
- Equipamento utilizado
- Microscópio estereoscópico marca Laborana, faixa de ampliação 14x a 90x, com câmera digital de 2 megapixels.
- Microscopia Eletrônica de Varredura e espectroscopia de raios X por energia dispersiva
- Segundo procedimento interno Lactec.
- Equipamento utilizado: energia dispersiva de raios X (EDS) marca Oxford.

O tubo no qual foi verificado vazamento é identificado por uma seta na figura a seguir:

Figura 9
seção que
problema



Entrada dos tubos na
contém o tubo com

Fonte: O Autor, 2018

- Microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Tescan, modelo VEGA 3, com detector de raio X.

É possível verificar que este tubo, estava parcialmente bloqueado pela parede das câmaras do cabeçote, como indicado pelas linhas tracejadas. Este foi o único tubo com vazamento encontrado e também o único parcialmente encoberto.

Em meio aquoso oxigenado de pH próximo ao neutro, situação similar à de operação do trocador de calor em questão, forma-se um filme de passivação sobre o cobre e suas ligas, que protege a superfície da corrosão. (Fonte: Lactec, 2018).

Deve-se relembrar o princípio da aderência. Segundo ele, o fluido junto a placa superior irá se deslocar com velocidade V_0 , enquanto aquele junto à placa inferior estará com velocidade nula. As camadas intermediárias deverão se adaptar as extremas, adquirindo velocidades que variam desde V_0 até zero.

Em cada seção normal as placas, como a seção AB genérica, irá se formar um diagrama de velocidades, onde cada camada do fluido desliza sobre a adjacente com uma certa velocidade relativa. Esse fato cria uma espécie de atrito entre as diversas camadas do fluido. (BRUNETTI, 2008).

Este filme de passivação é um óxido de cobre, portanto, sua formação consome uma pequena quantidade de cobre, mas que protege o material de ataque progressivo por ser resistente e aderente. Sabe-se, no entanto, que este filme pode ser retirado mecanicamente pela ação viscosa do fluido em velocidades superiores à 2 m/s (aproximadamente). A oclusão parcial do tubo modifica o regime local de escoamento, podendo levar à velocidade de superior à de projeto. (BRUNETTI, 2008).

Para as análises de microscopia ótica e de varredura, os tubos foram retirados do espelho e serrados longitudinalmente, para exposição do seu interior. Durante o procedimento de retirada do espelho os tubos sofreram deformação mecânica.

Os resultados das análises posteriores serão divididos em “tubo com defeito” e “tubo sem defeito” e cada um deles foi analisado em duas regiões: próximo à entrada (até cerca de 50 mm) e longe da entrada (a mais que 100 mm da entrada).

Figura 10 Seção longitudinal no trecho inicial (próximo ao espelho) do tubo com defeito.



Fonte: O Autor, 2018

É possível verificar que o tubo em ambas as imagens estava recoberto por uma camada alaranjada escura, cuja natureza será explicada posteriormente.

A imagem da esquerda da Figura 11 apresenta maior ataque, tanto concentrado (setas brancas) quanto perda de espessura da parede do tubo (retângulo tracejado). Isso sugere uma assimetria no ataque corrosivo, condizente com a hipótese de corrosão induzida pelo escoamento.

A característica dos tubos de cobre está no anexo B referente aos trocadores de calor.

Figura 11 Entrada do tubo que apresentou defeito.



Fonte: O Autor, 2018

O processo de retirada do tudo dos espelhos acabou deformando-os.

As setas nas figuras 11 e 12 mostram regiões com ataque corrosivo concentrado, onde houve perda de material mais significativa que suas vizinhanças imediatas. Duas hipóteses podem explicar este ataque concentrado, espécies químicas agressivas que quebram a camada de passivação natural do cobre (corrosão por pites ou corrosão induzida por microrganismos) ou por um perfil de velocidade de escoamento muito específico, que propiciou vórtices nestas regiões. Estas hipóteses serão testadas posteriormente.

A região delimitada pelos retângulos tracejados em ambas figuras 11 e 12, sofreu significativa perda de material da parede do tubo.

Figura 12 Seção longitudinal do tubo com defeito a 100 mm da entrada.



Fonte: O Autor, 2018

Verifica-se que, após aproximadamente 100 mm da entrada, o aspecto interno é consideravelmente diferente, sem apresentar perda de espessura nem ataque corrosivo localizado (na magnificação em questão). Apenas o acumulo de produto de corrosão alaranjado. Isto sugere que o nível de agressividade do ataque corrosivo é maior na região próxima à entrada do tubo, também condizente com a hipótese de ataque corrosivo induzido por fluxo.

Figura 13 Imagem de microscopia ótica próxima do início do tubo com defeito. 30x aumento.



Fonte: Lactec, 2018

A região superior esquerda é o início do tubo, e estava protegida por uma tinta, por isso manteve um aspecto íntegro. Tendo esta região como referência é possível ver uma severa perda de espessura.

Figura 14 Imagem próxima do início do tubo com defeito, detalhe na região que perdeu material. 30x aumento.

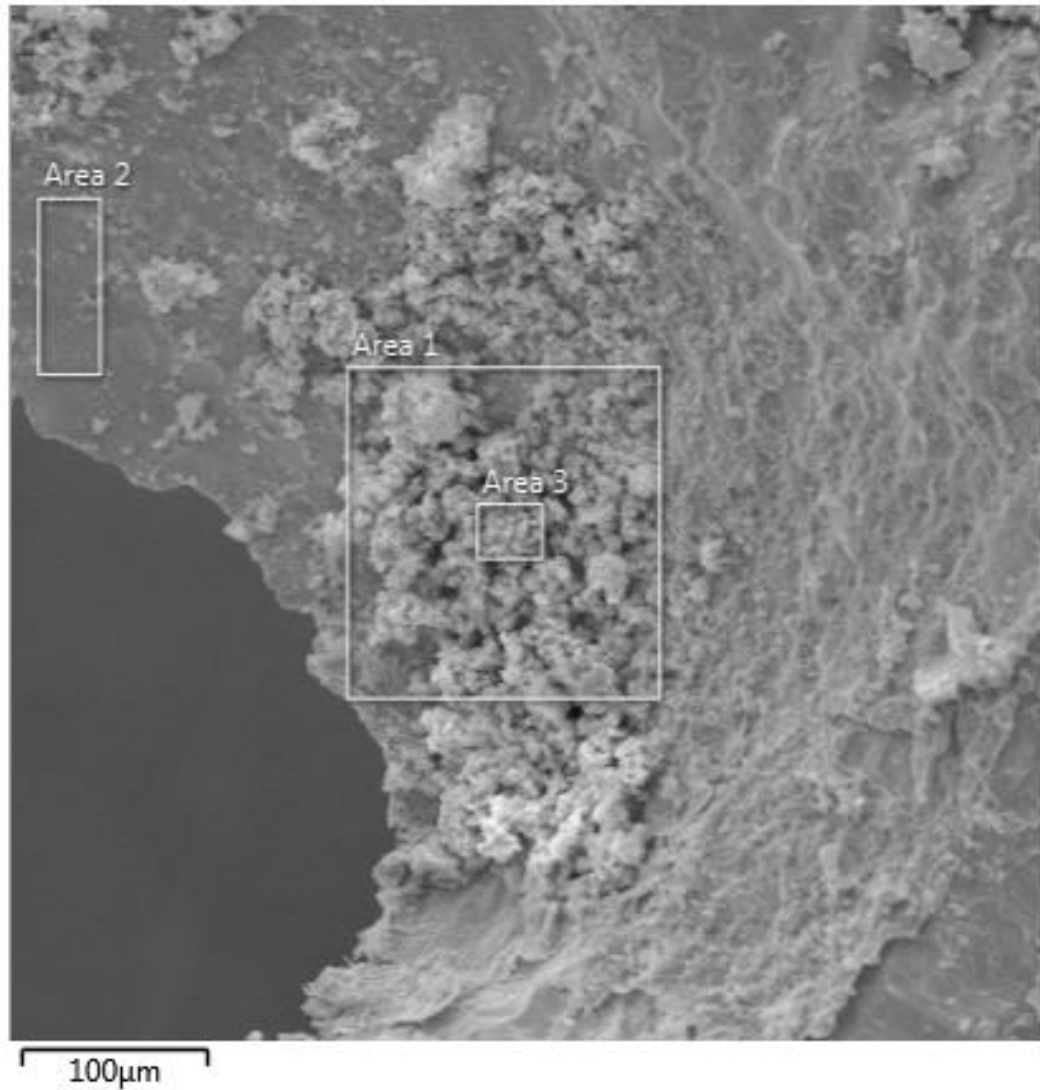


Fonte: Lactec, 2018

Verifica-se a presença de ranhuras na direção do fluxo de escoamento da água, evidenciando sua relação com o processo corrosivo.

E para avaliar em detalhe a região do vazamento e a natureza química do produto de corrosão foram realizadas medidas de microscopia eletrônica de varredura e EDS.

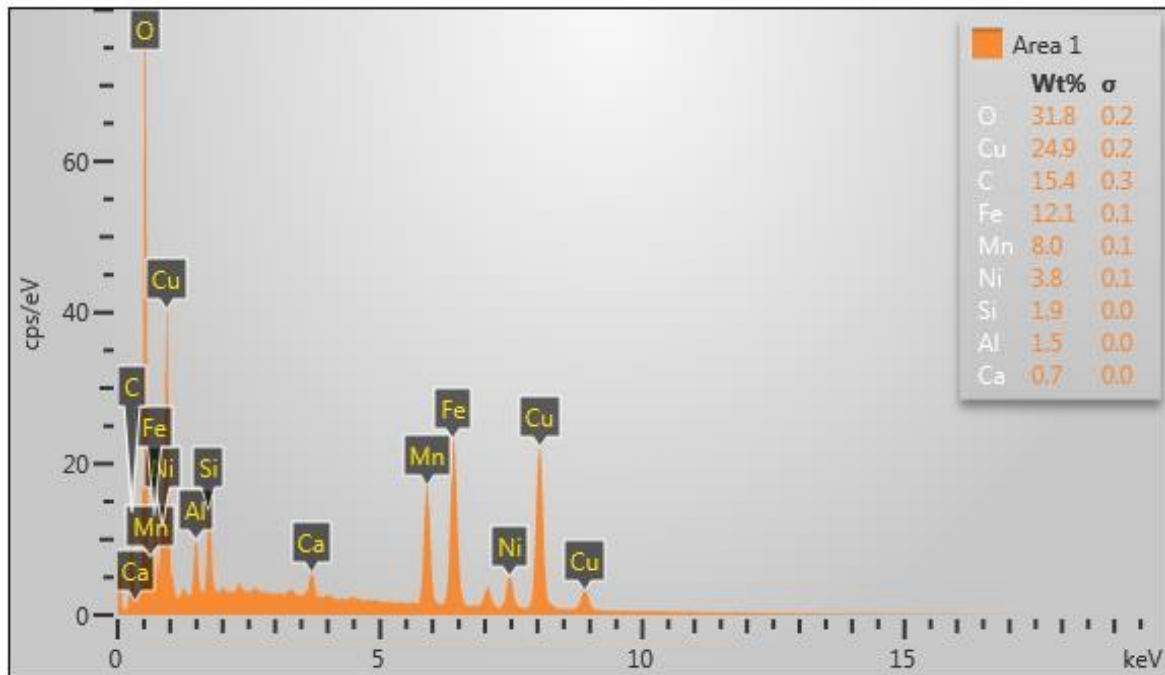
Figura 16 Detalhe das regiões onde foram realizadas análises elementares por EDS



Fonte: Lactec, 2018

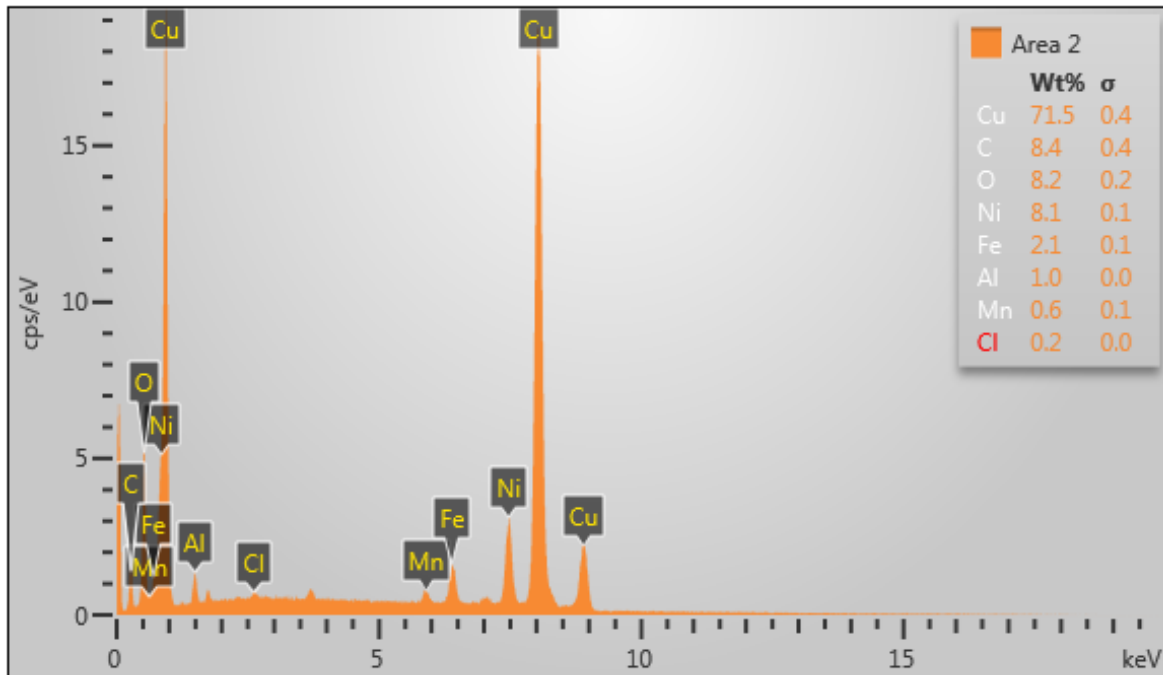
Os elementos químicos (e suas proporções em peso) encontrados nas regiões identificadas pelos retângulos na Figura 17, serão demonstrados logo abaixo nas próximas figuras.

Figura 17 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 1 da figura 17.



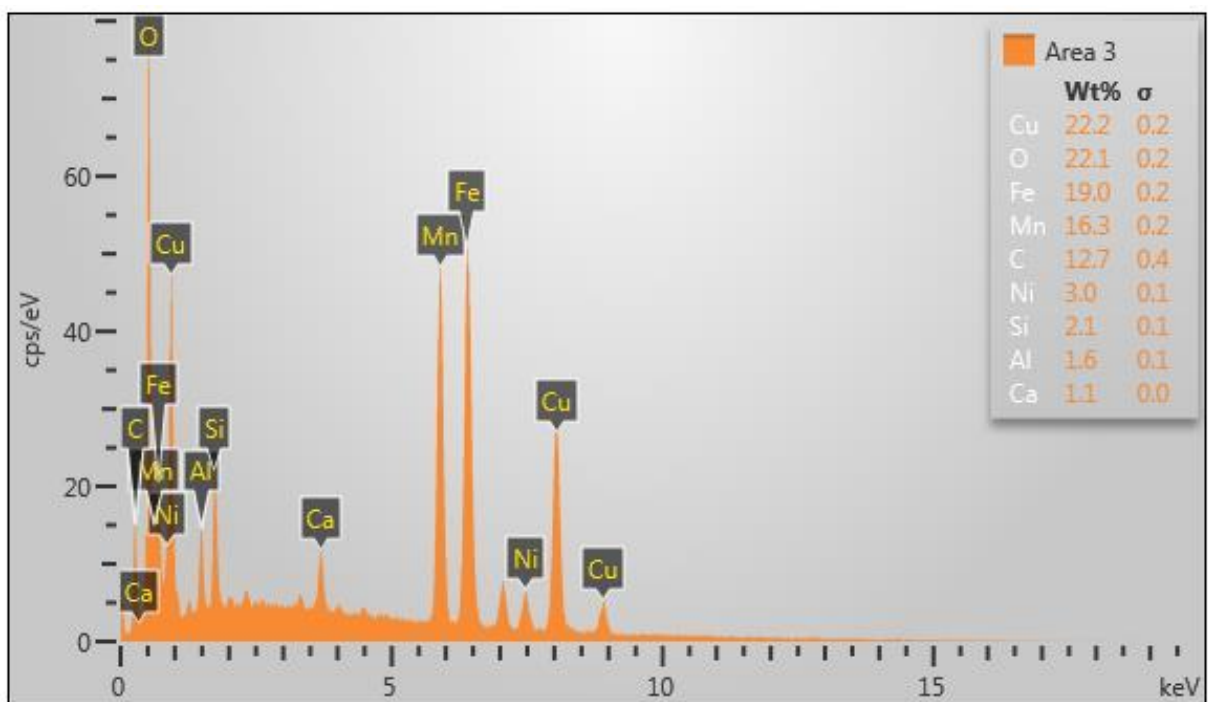
Fonte: Lactec, 2018.

Figura 18 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 2 da figura 17.



Fonte: Lactec, 2018.

Figura 19 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 3 da figura 17.



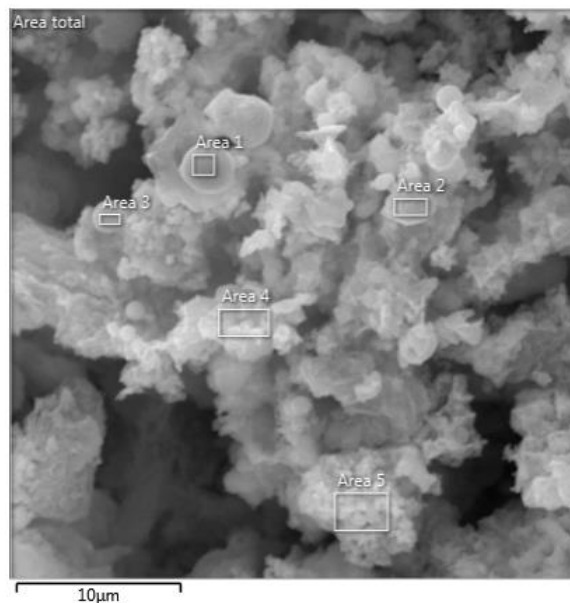
Fonte: Lactec, 2018

Os resultados mostrados nas Figura 18, 19 e 20 indicam que o depósito é principalmente constituído por óxidos de cobre e ferro (talvez hidróxido de ferro), além de

carbono, silício e alumínio, indicando que, além da corrosão da liga metálica, há também depósito de material proveniente da água. A área 2, figura 18, de uma região relativamente limpa, mostra uma proporção aproximada de uma liga Cu-Ni, da base do tubo.

Para avaliar o produto de corrosão próximo ao pite, em detalhe, foram realizadas análises morfológicas e elementares em magnificações superiores, mostradas nas imagens abaixo.

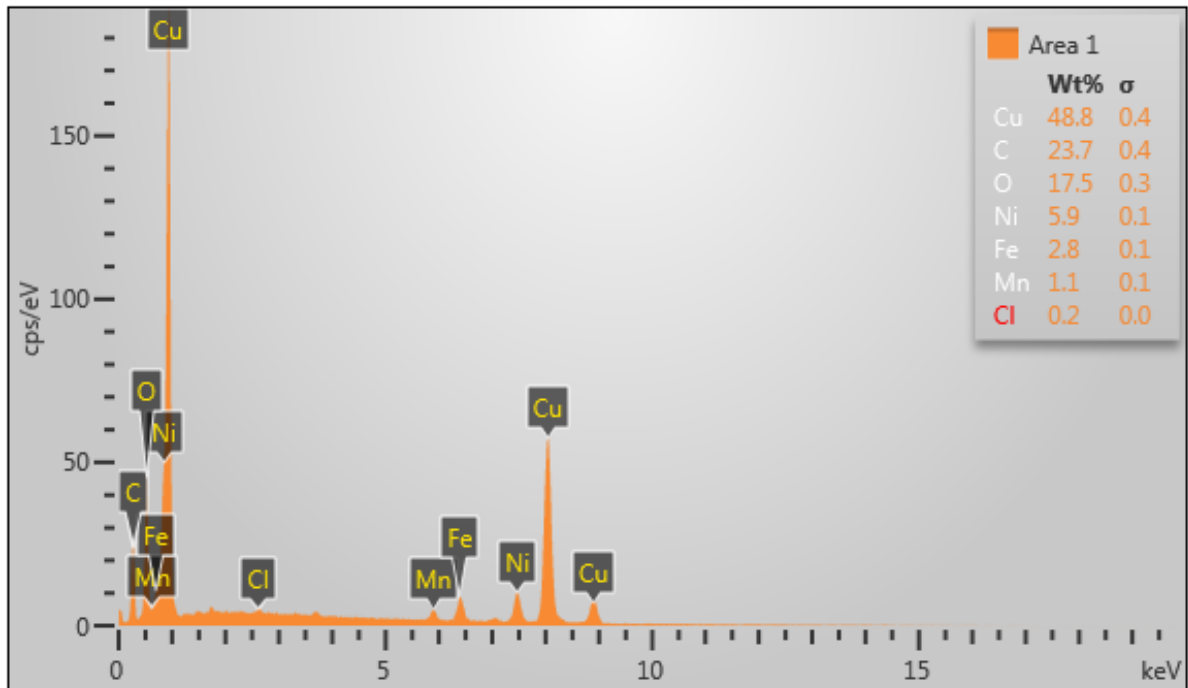
Figura 20 Imagem de MEV do produto de corrosão próximo a um pite passante, na entrada do tubo com defeito.



Fonte: Lactec, 2018

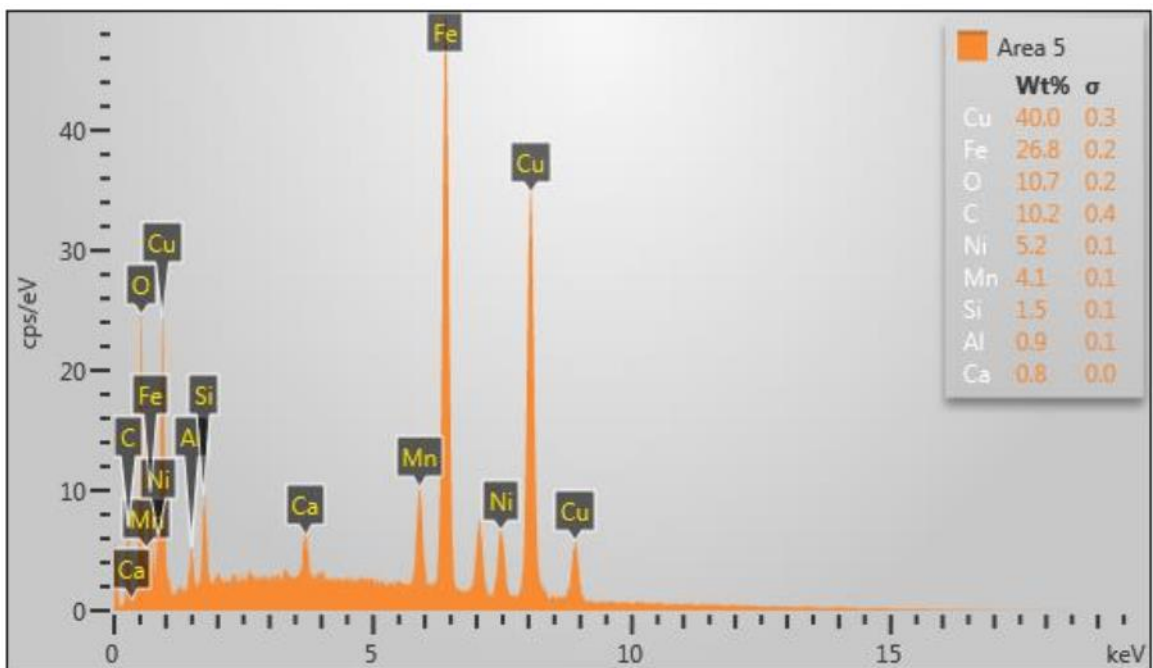
As análises elementares representativas das áreas indicadas na figura 16 estão mostradas nas figuras seguintes:

Figura 21 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 1.



Fonte: Lactec, 2018

Figura 22 Espectro de EDS com a proporção em peso dos elementos encontrados na Área 5.



Fonte: Lactec, 2018

Novamente, não se verifica a morfologia nem a presença de espécies tipicamente associadas à formação de pite (cloretos).

Também não se verifica a presença de enxofre. Outro mecanismo típico de falha de materiais a base de ligas de cobre em ambientes de água natural é a corrosão induzida por bactérias redutoras de sulfatos. Estas bactérias formam colônias que podem se fixar nas paredes dos tubos e que metabolizam os íons sulfato presente na água transformando-os em enxofre elementar. O sulfato não é agressivo ao cobre, mas o enxofre, mesmo que em pequenas, quantidade é, por isso estas colônias agem como geradoras e concentradoras de enxofre elementar, extremamente agressivo ao cobre.

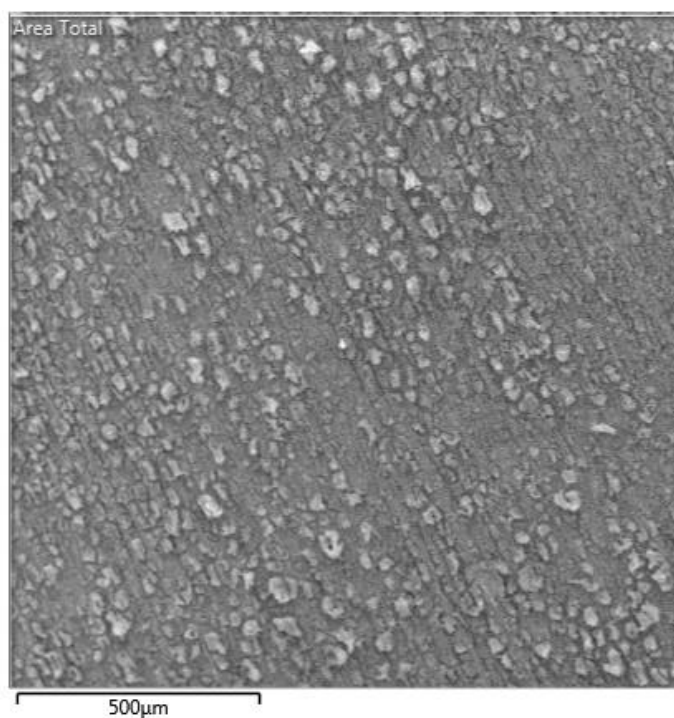
A hipótese de ataque localizado, seja por pites, seja por ação de microorganismos, foi descartada pela ausência de espécies químicas típicas nos produtos de corrosão analisados nos pontos de corrosão concentrada.

As demais áreas apresentaram resultados similares.

Uma análise da base da região onde se verificou maior perda de espessura é feita nas imagens seguintes.

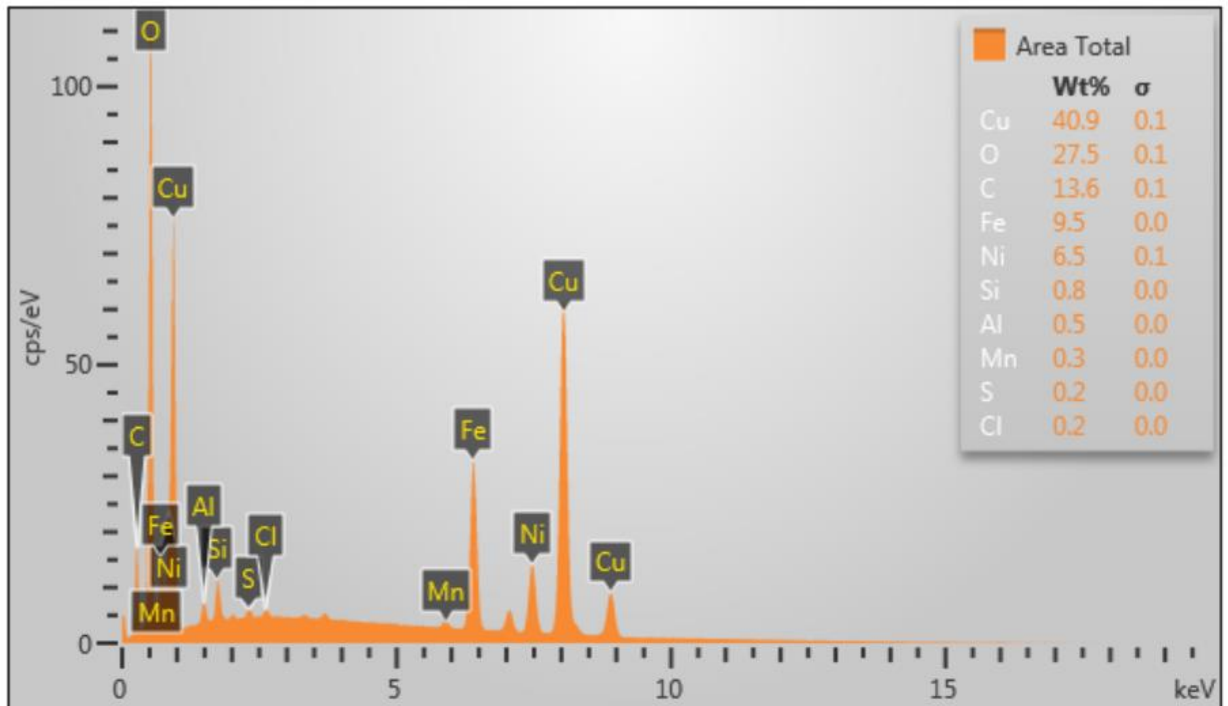
(Fonte: Lactec, 2018).

Figura 23 Imagem de MEV do início do tubo com defeito, detalhe na região que perdeu material.



Fonte: Lactec, 2018.

Figura 24 Análise elementar da área mostrada na Figura 24.

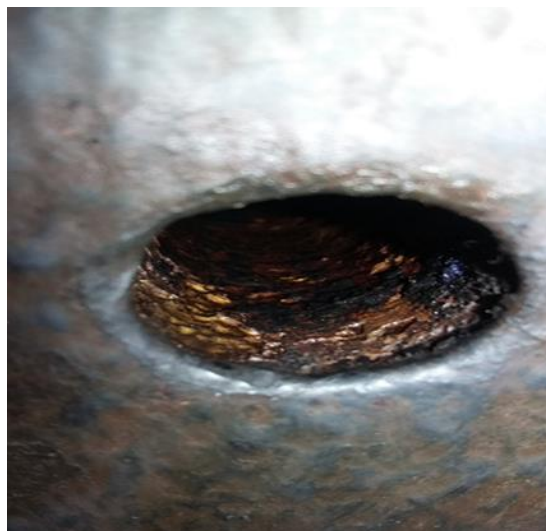


Fonte: Lactec, 2018

A morfologia mostra um ataque corrosivo direcional, condizente com a hipótese de corrosão induzida por fluxo, e a análise elementar apresentou uma composição típica de óxidos de cobre e ferro, sem evidências, portanto, de acúmulo de espécies químicas agressivas.

As imagens a seguir demonstram os procedimentos para correção dos defeitos detectados.

Figura 25 Incrustações no interior do tubo.



Fonte: O Autor, 2018

Estamos demonstrando como estava a superfície interna do tubo de cobre, onde parece que está com uma camada de substância encrostada de material desconhecido.

Figura 26 Furo no tubo antes de realizar a parada da unidade geradora consegui visualizar o furo no tubo, onde está medindo aproximadamente 1,5mm.



Fonte: O Autor,2018.

Figura 27 Tamponando o tubo



Fonte: O Autor, 2018.

Realizado testes obstruindo os furos de entrada e saída com material em teflon, as após ser pressurizado não houve êxito pois continuou com vazamento.

Figura 28 Tubos necessitando de limpeza



Fonte: O Autor,2018.

Ao abrir os cabeçotes laterais observamos que estava necessitando de limpeza interna nos tubos para realizarmos a pressurização dos mesmos.

Figura 29 Tubos após a limpeza



Fonte: O Autor,2018.

Após realizar a limpeza podem observar como melhorou a forma para encontrar os desvios que se encontrava.

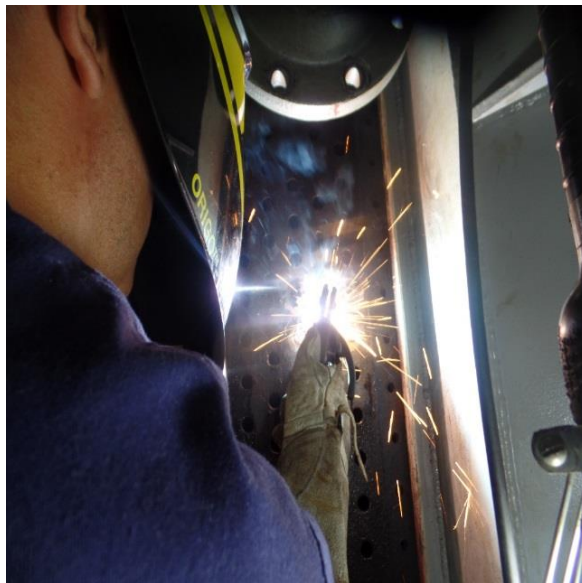
Figura 30 Tubos prontos para serem soldados.



Fonte: O Autor,2018.

Tamponando uma região onde foi encontrado alguns tubos com problemas, sendo assim foi realizado a confecção de eixos para ser usado na entrada e saída dos tubos para sanar o problema.

Figura 31 Solda sendo realizada



Fonte: O Autor,2018.

Conforme foto acima mostrado o posicionamento dos tampões, dando sequência no trabalho agora estamos aplicando a solda para não deixar haver vazamento no sistema.

Figura 32 Executando líquido penetrante.



Fonte: O Autor,2018.

Após realizamos o líquido penetrante e aplicado o revelador para ter certeza que estava tudo dentro do esperado, mas conforme a foto podemos ver vários pontos do líquido penetrante sendo assim foi esmerilhado os pontos e refeito novamente a solda até que ficou 100%.

Figura 33 Furo isolado após testes



Fonte: O Autor,2018.

Conforme descrito acima está mostrando o trabalho após um tubo ser totalmente realizado o fechamento e não apresentado necessidade de refazer o trabalho.

Figura 34 Aplicando a tinta para não haver corrosão



Fonte: O Autor,2018.

Aplicado Alcatrão de Uliá para acabamento após o trabalho para não haver desgaste por corrosão na face do trocador de calor.

Figura 35 Troca do radiador



Fonte: O Autor,2018.

Está sendo mostrando a troca do trocador de calor que estava em stand by, pois o que estava em operação foi retirado por apresentar mais de 30% dos tubos com defeitos assim perdendo a troca de calor necessária de trabalho.

5 CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que a causa da corrosão foi, principalmente velocidade elevada de escoamento e turbilhonamento na estrada do tubo, causados pela obstrução parcial pela parede do cabeçote do trocador.

Há diversos casos registrados deste tipo de mecanismo, especialmente para trocadores de cobre e suas ligas conforme especificado no relatório da Lactec.

Verificou se também acumulo de óxido de ferro e cobre fracamente aderidos aos tubos, condizentes com a composição do filme de passivação do cobre e com o fato de haver ferrobactérias presentes na água que induzem a formação de produtos de corrosão do ferro, presente nos espelhos e cabeçotes do trocador de calor.

O depósito de óxido de ferro não é particularmente agressivo a materiais a base de cobre, não foi encontrado evidência de espécies agressivas e corrosão localizada (pites), nem indícios da presença de bactéria redutoras de sulfato. (Fonte: Lactec, 2018).

Nos estudos internamente verificou se que a pressão estava acima do limite da especificação técnica como outros fatores que vai de encontro com o escoamento muito acima pois o manual interno Baesa 2018, diz que o correto é de 670m³/h e se encontrava com 1060 m³/h e pressão com 8,2 bar onde a pressão tem que estar em torno de 7,2 a 7,9 bar, estaremos realizado a troca da espessura do tubo para aumentar a vida útil do equipamento de 13 anos para no mínimo 20 anos de uso.

REFERÊNCIAS

- ANELL – Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Informações Gerenciais**. 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/15191504/DD_IG_1_1.pdf/9151ee40-af8e-029a-cc15-61387f44ad04>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- ANDRIETTA, J. M.; MIGUEL, P. A. C. Aplicação do programa seis sigma no Brasil: resultados de um levantamento tipo survey exploratório-descritivo e perspectivas para pesquisas futuras. **Gestão & Produção**, v. 14, n. 2, p. 203-219, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v14n2/01.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2018.
- BAESA. **Manual Interno de Operação**. 9 volumes. 2014.
- BALTAZAR, R. **Lean Manufacturing**, 2015. Disponível em: <<https://www.lean.org.br/>> Acesso em: 13 nov. 2018.
- BAPTISTA, J. A. **A Importância da Análise de Causa Raiz na melhoria do desempenho da manutenção Industrial**. 2007. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/arquivos/191/191.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluídos**. 2ª ed. revisada. São Paulo, Editora: Pearson Prentice Hall, 431p. 2008.
- DEMING, W. E. **Qualidade: a revolução na administração**. Rio de Janeiro, Marques-Saraiva, 1990.
- HALLIDAY, **Fundamentals of Physicals**, volume 1, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, Rio de Janeiro, 2001.
- HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**. 8ª edição. Madrid: Concepción Fernández Madrid, 1998.
- INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p, 2008.
- KIMBERLY-CLARK. **Apostila Lean Seis Sigma**. 2014.
- LACTEC, **Quem somos**. Disponível em: <<http://www.lactec.org.br/submenu-instituto/quem-somos/>>. Acesso em: 20 nov. 2018
- LIKER, J. K.; MEIER, D. **O modelo Toyota: manual de aplicação**. Bookman, Porto Alegre, 2007.
- MADI, M. **Otimização do período de limpeza de trocadores de calor utilizados no refino de petróleo**. TTC - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Curitiba, 2005. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/diretorias/dirppg/programas/ppgem/banco-teses/dissertacoes/2006/MADIMarcio.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MARTINELLI JR, L. C. **Transferência de Calor Parte V: Trocadores de Calor**. Trabalho Acadêmico – Unijuí, Ijuí, 2000.

ROTONDARO, R. G. Visão Geral. ROTONDARO, R. G. (Org.) **Seis Sigma estratégia gerencial para a melhoria dos processos, produtos e serviços**. São Paulo: Atlas, 2002, p. 17-22.

SILVA, D. H. J. **Processamento de Sinais para Monitoramento de Vibrações em Unidades Geradoras Hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUBD-9GAHVK>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

SHAH, R.K., SEKULIC, D.P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**, Chapter 10, Wiley, New York, NY., 2003.

SCHENKEL, K. A. **Monitoramento da efetividade térmica de trocadores de calor**, TCC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

ANEXOS

ANEXO B: DADOS TÉCNICOS REFERENTE AOS TROCADORES DE CALOR

Figura 37

CONEXÕES					
MARCA	QUANT.	CLASSE	DIMENSAO	ACABAMENTO DA FACE	SERVICO
A	01	WN-RF ANSI-150#	ØN. 6"	RANHURAS ESPIRAIS COM RUGOSIDADE DE 250 RMS	ENTRADA DE AGUA
B	01	WN-RF ANSI-150#	ØN. 6"		SAIDA DE AGUA
C	01	TUBO SCH.40	————	————	RESPIRO + ELIMINADOR DE AR MODELO EA-200
D	01	TUBO SCH.40	————	————	DRENO + REGISTROS DE GAVETA ØN. 1/2" BSP (BRONZE)
CODIGO : REFERENCIA DE CALCULO MECANICO, ASME SEC.VIII-DIV.1 ED.1998 + STD GEA					
POSICAO:-FLUXO DO AR HORIZONTAL (C)					
TOLERANCIAS: CONFORME PADRAO GEA NI-0011					
CONDICOES DE OPERACAO			LADO EXTERNO		LADO INTERNO
FLUIDO			AR		AGUA
PRESSAO DE TRABALHO Kgf/cm ²			0		9 (MAN.)
PRESSAO DE PROJETO Kgf/cm ²			————		9 (MAN.)
PRESSAO DE TESTE Kgf/cm ²			————		13,5 (MAN.)
TEMPERATURA DE TRABALHO °C			ENTR.: 66,21 SAIDA: 40		ENTR.: 30 SAIDA: 34,2
TEMPERATURA DE PROJETO °C			100		100
VAZAO m ³ /h			66000		106,66
PERDA DE CARGA ADMISSIVEL mm.CA.			18		4500
VELOCIDADE DE ESCOAMENTO m/s			3,12		2
NUMERO DE PASSES			1		4
AREA DE TROCA DE CALOR			1043,72 m ²		
CAPACIDADE DE TROCA TERMICA			516,70 kW		
PESO VAZIO APROXIMADO (UNIT.) VAZIO			~ 1580 kgf		
QUANTIDADE			6+6+6=18 EQUIPAMENTOS		
ESPECIFICACAO DE MATERIAIS					
DISCRIMINACAO			MATERIAIS		
TUBOS DO FEIXE (Ø20xESP. 1,0 mm)			B-111-706 (CU-NI 90/10)		
ALETAS			B-152-122 (COBRE)		
ESPELHOS			A-516-60 (ACO CARBONO)		
CABECOTES			A-516-60 / A-36 (ACO CARBONO)		
LATERAIS			ACO CARBONO COMERCIAL		
FLANGES / LUVAS / PLUGS / TUBOS SCH.40			A-105 / A-106-B (ACO CARBONO)		
PARAFUSOS CABECOTES (BICROMATIZADOS)			A-193-B7 (ACO CARBONO)		
PARAFUSOS ESTRUTURAL (BICROMATIZADOS)			A-325 (ACO CARBONO)		
PLACA DE IDENTIFICACAO			ACO INOX-304		
GAXETAS DOS CABECOTES			BORRACHA ACRILÓ-NITRILA/F-15		
BANDEJA COLETORA DE CONDENSADO (PADRAO GEA)			ACO INOX-304		

Figura 38

01	Dados de Operação (para 1 radiador)			Lado Externo (Aletado)	Lado Interno (Tubos)
02	Fluído			Ar do gerador	Água de Rio
03	Vazão	Kg/h		70.620,0 (66.000 m ³ /h a 40°C e 478,0m de altitude)	106.340,0 (106,66 m ³ /h) a 30°C
04	Temperatura de Entrada	°C		66,11	30,0
05	Temperatura de Saída	°C		39,97	34,18
06	Temperatura de Projeto	°C		100,0	100,0
07	Pressão de Operação	Kgf/cm ² G		0,0	9,0
08	Pressão de Projeto	Kgf/cm ² G		0,0	9,0
09	Pressão de Teste	Kgf/cm ² G		0,0	13,5
10	Número de Passes			1	2
11	Velocidade do Fluído			3,23 (face)	1,39
12	Perda de Carga			9,1 mmH ₂ O	0,139
13	Fator de Incrustação			---	---
14	LMTD (Corrigido)	18,86	°C	Coeficiente global de troca térmica	
15	Superfície de troca térmica:	933,1	m ²	Quantidade de calor trocado	
				944,8	kcal/hm ² °C
				516,7	KW
16	Tubos Ø externo	20,0	mm	Aletas planas Espessura	
17	Espessura dos tubos	1,50	mm	Número de Aletas por metro	
				0,15	mm
					500
18	Material dos tubos			Cuproníquel	Material das aletas
					Cobre

01	Dados de Operação (para 1 radiador)			Lado Externo (Aletado)	Lado Interno (Tubos)
02	Fluído			Ar do gerador	Água de Rio
03	Vazão	Kg/h		70.620,0 (66.000 m ³ /h a 40°C e 478,0m de altitude)	127.608,0 (127,99 m ³ /h) a 30°C
04	Temperatura de Entrada	°C		71,41	30,0
05	Temperatura de Saída	°C		40,00	34,18
06	Temperatura de Projeto	°C		100,0	100,0
07	Pressão de Operação	Kgf/cm ² G		0,0	9,0
08	Pressão de Projeto	Kgf/cm ² G		0,0	9,0
09	Pressão de Teste	Kgf/cm ² G		0,0	13,5
10	Número de Passes			1	2
11	Velocidade do Fluído			3,28 (face)	1,67
12	Perda de Carga			9,17 mmH ₂ O	0,195
13	Fator de Incrustação			---	---
14	LMTD (Corrigido)	20,74	°C	Coeficiente global de troca térmica	
15	Superfície de troca térmica:	933,1	m ²	Quantidade de calor trocado	
				972,4	kcal/hm ² °C
				621,0	KW
16	Tubos Ø externo	20,0	mm	Aletas planas Espessura	
17	Espessura dos tubos	1,50	mm	Número de Aletas por metro	
				0,15	mm
					500
18	Material dos tubos			Cuproníquel	Material das aletas
					Cobre
19	Pescoços SCH 40			Cabeçotes Tipo "Cartola"	
20	Código de Construção			NR 13	Classe: --- Categoria: ---
21				Pesos (Kg)	Vazio ~1580 Cheio ---

Nota: nesta condição de sobrecarga (01 fora de operação) o equipamento apresenta uma reserva de 13% de superfície de troca térmica