

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANTONIO DIMAEL DE ALMEIDA LOPES

INFLUÊNCIA DE INCRUSTAÇÕES NA EFICIÊNCIA DE TROCADORES DE CALOR: O CASO DA PERDA DE PRODUTIVIDADE EM HIDRELÉTRICAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BELÉM-PA

2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**INFLUÊNCIA DE INCRUSTAÇÕES NA EFICIÊNCIA DE TROCADORES DE
CALOR: O CASO DA PERDA DE PRODUTIVIDADE EM HIDRELÉTRICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Processos Industriais.

Antonio Dimael de Almeida Lopes

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Lopes, Antonio Dimael de Almeida

Influência de incrustações na eficiência de trocadores de calor: o caso da perda de produtividade em hidrelétricas /Antonio Dimael de Almeida Lopes; orientador, Emanuel Negrão Macêdo._ Belém , 2011

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011

1 Calor- transmissão 2 . Mecânica dos fluidos 3. Usinas hidrelétricas I. Título

CDD 22.ed. 621.4025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANTONIO DIMAEL DE ALMEIDA LOPES

**INFLUÊNCIA DE INCRUSTAÇÕES NA EFICIÊNCIA DE TROCADORES DE
CALOR: O CASO DA PERDA DE PRODUTIVIDADE EM HIDRÉLETRICAS**

DEFESA DE MESTRADO

Esta Dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração em Processos Industriais do Programa de Pós-graduação Strictu Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará-ITEC-UFPA.

Belém, 16 de Setembro de 2011

Aprovada por:

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo.
(Orientador-UFPA)

Prof. Dr. José Antonio de Souza Silva.
(Membro-UFPA)

Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza.
(Membro-UFPA)

BELÉM-PA
2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, a minha família: irmãos, irmãs e sobrinhos, e em especial a minha mãe Izabel e ao meu pai Raimundo Lopes. Que sempre estiveram perto quando necessitei e me deram tudo o que estava ao seu alcance e dentro de suas possibilidades.

Agradeço também a minha Cristiane que sempre esteve comigo e compreendeu os momentos dos quais tivemos que renunciar em função da realização deste trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo, pelo acompanhamento e ajuda dada na realização desta dissertação.

Aos professores da Universidade Federal do Pará (UFPA) que contribuíram com a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia (ITEGAM) pelo apoio e a possibilidade da realização deste trabalho.

A empresa Amazonas Energia, onde desenvolvi este trabalho.

Aos meus colegas do mestrado que estiveram comigo durante tão árdua caminhada.

Aos meus amigos Bezerra, Edson e Sampaio pela ajuda dispensada durante a execução deste trabalho.

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Izabel e Raimundo Lopes, dois
guerreiros da vida real.*

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado”

Autor: Roberto Shinyashiki

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1	Maiores Emissores de CO ₂	19
Gráfico 1.2	Potencial Hídrico a ser Utilizado	21
Gráfico 5.1	Histórico de Limpeza de 1998 a 2008	77
Gráfico 5.2	Quantidade de Limpezas por Mês	78
Gráfico 5.3	Percentual de Paradas por Máquina	79
Gráfico 5.4	Perfis de Temperatura por Radiador	80
Gráfico 5.5	Temperatura dos Enrolamentos da UGH 05	82
Gráfico 5.6	Temperatura de Ar Quente da UGH 05	83
Gráfico 5.7	Comparativo de Redução de Temperatura	84
Gráfico 5.8	Temperatura de Ar Frio por Radiador	85
Gráfico 5.9	Aumento de Temperatura Pós Instalação	86
Gráfico 5.10	Quantidade de Calor Versus Tempo de Operação	89
Gráfico 5.11	Temperatura de Saída X Tempo de Operação	90
Gráfico 5.12	DTML em Função do Tempo	90
Gráfico 5.13	Coeficiente de Transferência de Calor	91
Gráfico 5.14	Efetividade por Tempo	91
Gráfico 5.15	Comparativo do Coef. de Transferência de Calor	92
Gráfico 5.16	Temperaturas de Saídas dos Fluidos Frios	92
Gráfico 5.17	DTML dos Trocadores da UGH 04 e UGH 05	93
Gráfico 5.18	U da Máq. 04 em Comparação ao da Máq. 05	93
Gráfico 5.19	Efetividade da UGH 04 e da UGH 05	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de uma Usina Hidrelétrica	30
Figura 2.2	Rotor de um Hidrogerador	33
Figura 2.3	Turbina Pelton	34
Figura 2.4	Turbina Francis em Perspectiva	35
Figura 2.5	Turbina Kaplan em Corte	36
Figura 2.6	Típico Equipamento Trocador de Calor	37
Figura 2.7	Esquema de um Trocador de Calor Casco	38
Figura 2.8	Radiador Industrial	39
Figura 2.9	Esquema de um Trocador de Calor a Placas	40
Figura 2.10	Esquema de Trocador Espiral	41
Figura 2.11	Aquecedor de Gás Natural	42
Figura 2.12	Processo de Gaseificação de Nitrogênio	43
Figura 2.13	Gerador de Vapor	43
Figura 2.14	Unidade Condensadora de Condicionador de Ar	44
Figura 3.1	Tubo Incrustado em Corte	45
Figura 3.2	Gráfico Fouling em Função do Tempo	50
Figura 3.3	Biofouling Registrado em MEV	53
Figura 3.4	Incrustação por Sais	56
Figura 3.5	Incrustação Inorgânica	57

Figura 4.1	Foto de Termopares	59
Figura 4.2	Fotos de Varetas	60
Figura 4.3	Procedimento de Varetamento Manual	61
Figura 4.4	Tanque de Mistura de Hipoclorito de cálcio	62
Figura 4.5	Foto de Satélite do Lago de Balbina	63
Figura 4.6	Análise Físico-Química e Biológica da Água	64
Figura 4.7	Passagem de Água pelo Radiador	65
Figura 4.8	Radiador 04 da UGH 05	67
Figura 4.9	Desenho da Modificação da Tubulação	68
Figura 4.10	Válvula de Reversão	69
Figura 4.11	Painel de Comando da Válvula Automática	70
Figura 4.12	Detalhe do Corte e Solda na Tubulação	71
Figura 4.13	Elemento de Limpeza	72
Figura 4.14	Retentor	72
Figura 5.1	Medidor de Temperatura	75
Figura 5.2	Sensores do Medidor Ultra Sônico	76
Figura 5.3	IHM do Medidor Ultra Sônico	76
Figura 5.4	Passes do Trocador	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Matriz Energética Mundo X Brasil	21
Tabela 2.1	As Dez maiores Usinas Hidrelétricas do Mundo	29
Tabela 2.2	Usinas, Reservatórios e Áreas Alagadas Brasileiras	31
Tabela 4.1	Características do Processo e dos Radiadores	66
Tabela 5.1	Comparativo de Redução de Temperatura	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Classe de Microorganismos, Nutrientes e Danos	54
Quadro 5.1	Histórico de Limpeza dos Radiadores da UHE	77
Quadro 5.2	Limpeza Ano X Máquina	78
Quadro 5.3	Custos de Limpezas Manuais por Ano em R\$	88

LISTA DE SIGLAS SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AF	Ar Frio
AQ	Ar Quente
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CACO ₃	Carbonato de Cálcio
CACO ₃ /L	Carbonato de Cálcio por Litro
CO ₂	Dióxido de Carbono
DTML	Diferença de Temperatura Média Logaritima
E.U	União Européia
Fe	Ferro
G	Gerador
G	Aceleração da Gravidade
Kg	Quilo grama
Kgf/cm ²	Quilograma Força por Centímetro Quadrado
KJ	Quilo Joule
Km ²	Quilometro Quadrado
m	Metro
m/s	Metro por Segundo
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mgFe/L	Miligrama de Ferro por Litro
mgO ₂ /L	Miligrama de Oxigênio por Litro
MW	Mega Watt
N ₂	Nitrogênio
NO ₃	Nitrato
pH	Potencial Hidrogeniônico
PRFV	Polímero Revestido com Fibra de Vidro
PVC	Cloreto de Polivinila
SO ₄	Sulfato

T.C	Trocador de Calor
t_{fq}	Temperatura de Saída do Fluido Quente
t_{fs}	Temperatura de Saída do Fluido Frio
IHM	Interface Homem Máquina
ITEGAM	Instituto de Tecnologia Galileu da Amazônia
UFPA	Universidade Federal do Pará
PTFE	Politetrafluoretileno
Ufc	Unidade Formadora de Colônia
UGH	Unidade Geradora Hidráulica
UHE	Usina Hidrelétrica
Q	Taxa de Energia Transferida
U	Coefficiente Global de Transferência de Calor
A	Área
ΔT	Diferença de temperaturas
f	Fator de correção da DTML
R_w	Resistência Condutiva
R_f	Fator de Incrustação
η_0	Eficiência Global da Superfície
f	Fator de Atrito
K_f	Condutibilidade térmica
t_f	Espessura da Incrustação
Φ_d	Taxa de Depósito de Incrustação
Φ_r	Taxa de Remoção de Incrustação

RESUMO

Trocadores de calor são equipamentos amplamente utilizados em processos industriais, e diversas aplicações, em algumas situações para aquecer um fluido outras resfriar um fluido, mas o que independente de onde este é aplicado, normalmente o trocador de calor tem grande responsabilidade. Os trocadores de calor também são utilizados em hidrelétricas, pois as plantas de geração de energia hidráulica possuem sistemas que realizam trabalho, conseqüentemente geram energia em forma de calor e este precisa ser controlado de forma a não elevar a temperatura de operação do sistema a níveis que inviabilizem o seu funcionamento, neste contexto se utilizam os trocadores de calor que na maioria das vezes, nas usinas hidráulicas utilizam água como fluido de resfriamento, que é coletada diretamente do reservatório, este modo de operação é vantajoso, quando olhamos apenas para o grau de complexidade, pois na maioria das vezes os sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas são do tipo aberto, ou seja, a água é captada do reservatório, alimenta os trocadores de calor em seguida é descartada para o rio, porém quando analisamos o item produtividade, vimos que no sistema aberto temos uma desvantagem, como o volume de água é elevado fica difícil o seu tratamento adequado para uso em trocadores industriais, como isso ocorrem os problemas de corrosão e também incrustação, causando perdas de eficiência nos trocadores de calor e conseqüentemente no processo ao qual ele esteja inserido, chegando até mesmo a parar totalmente o processo. Neste trabalho será avaliado se a aplicação de um processo de limpeza mecânica automatizada eliminaria ou minimizaria a perda de eficiência dos trocadores de calor do sistema de refrigeração de gerador hidráulico.

Palavras-chaves: Perda de eficiência, trocadores de calor, hidrelétricas e incrustação.

ABSTRACT

Heat exchangers are devices widely used in industrial processes, and various applications, in some situations to heat a fluid other cooling fluid, but that regardless of where it is applied usually the heat exchanger has a great responsibility. The heat exchangers are also used in power plants, because plants have hydraulic power generation systems that perform work, therefore generate energy as heat and this must be controlled so as not to raise the temperature of operation of the system to levels that impede the operation, in this context is the use of heat exchangers for the most part, hydraulic power plants use water as cooling fluid, which is collected directly from the reservoir, this mode of operation is advantageous, when we look only to the degree of complexity, because in most cases the cooling systems of power plants are open-ended, is, water is captured from the reservoir feeds the heat exchanger is then discarded into the river, but when we analyze the productivity item, we open system in which we have a disadvantage, as the volume of water is high it is difficult to appropriate treatment for use in industrial heat exchangers, such as this occur the problems of corrosion and fouling also, causing losses of efficiency in heat exchangers and therefore in the process to which it is inserted, reaching even to stop the process entirely. This work will be assessed if the application of an automated mechanical cleaning process to eliminate or minimize the loss of efficiency of heat exchangers of the cooling system water generator.

Keywords: Loss of efficiency, heat exchangers, hydroelectric and inlay.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	23
1.2.2-OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
1.3 JUSTIFICATIVA.....	24
1.4 ESTRUTURA DAS DISSERTAÇÃO.....	24

CAPÍTULO II – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ESTADO DA ARTE EM TROCADORES DE CALOR E PERDA DE EFICIÊNCIA DE HIDRELÉTRICAS	26
2.2 HIDRELÉTRICAS.....	28
2.2.1 RESERVATÓRIOS.....	30
2.2.2 HIDROGERADORES.....	33
2.2.3TURBINAS.....	32
2.2.3.1 TURBINAS PELTON.....	34
2.2.3.2 TURBINAS FRANCIS.....	34
2.2.3.3 TURBINAS KAPLAN.....	35
2.3 TROCADORES DE CALOR.....	36
2.3.1 QUANTO A SUA CONSTRUÇÃO.....	37
2.3.2 QUANTO A SUA FINALIDADE.....	41

CAPÍTULO III – PERDAS DE EFICIÊNCIA EM TROCADORES DE CALOR

3.1 PERDAS DE EFICIÊNCIA EM TROCADORES DE CALOR.....	45
3.1.1 INCRUSTAÇÃO ORGÂNICA.....	52
3.1.1.1 TIPOS DE MICROORGANISMOS.....	53
3.1.1.2 FATORES QUE POTENCIALIZAM O BIOFOULING.....	55
3.1.2 INCRUSTAÇÃO INORGÂNICA.....	56

CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
4.1.1 TIPOS DE LIMPEZAS UTILIZADAS.....	59
4.1.2 COMPONENTES DO SISTEMA.....	62

CAPÍTULO V - ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	73
5.1.1 ÁGUA DE RESFRIAMENTO.....	73
5.1.2 PARÂMETROS DO PROCESSO.....	75
5.1.3 DADOS DE PRODUTIVIDADE ANTES DO SISTEMA.....	77
5.1.4 RESULTADOS OPERACIONAIS PÓS SISTEMA.....	80
5.1.5 ANÁLISE TÉRMICA DOS TROCADORES DE CALOR.....	88

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES.....	95
6.2 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
6.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

CAPITULO I

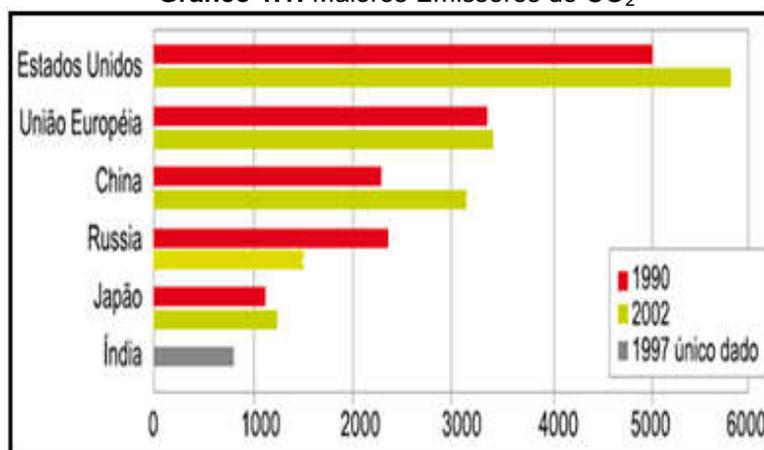
1.1 INTRODUÇÃO

No atual nível de desenvolvimento tecnológico e social em que a humanidade se encontra, fica difícil imaginar como o ser humano viveria nos dias de hoje sem energia elétrica.

A energia elétrica desempenha um papel fundamental na vida humana: ao lado de transporte, telecomunicações águas e saneamento, compõem a infraestrutura necessária para incorporar o ser humano ao denominado modelo de desenvolvimento vigente. Por isso, o tratamento dos temas energéticos no seio desta infraestrutura será da maior importância para que se caminhe na busca de um desenvolvimento sustentável. (REIS 2003).

De uma forma geral a matriz energética mundial ainda é baseada em combustíveis fósseis e especificamente na geração de energia elétrica isto não é diferente. Salvo em alguns países, a grande maioria tem como base de sua matriz geradora de eletricidade derivados de petróleo ou carvão. Entretanto com a preocupação latente com o aquecimento global, devido às emissões de CO₂ proveniente da queima destes combustíveis, algumas nações, na busca por alternativas, ainda que num primeiro momento econômico e/ou militar, motivados pelas incertezas políticas dos países exportadores de petróleo, acabaram por tentar diversificar suas possibilidades de geração de energia. No Gráfico 1.1, os países que mais emitem CO₂ são os países europeus e Estados Unidos.

Gráfico 1.1: Maiores Emissores de CO₂



Fonte: CNI, (2005).

O uso da geração hidráulica, em comparação com as termoelétricas movidas com derivados de petróleo ou carvão é muito menos agressivo ao meio ambiente, no que diz respeito às emissões de carbono para atmosfera.

Contudo a idéia de utilizar energia hidráulica é muito mais antiga do que pudéssemos imaginar. Esta foi uma das primeiras alternativas de substituição do trabalho animal (e em muitas civilizações até mesmo escravo), em início e, particularmente, para bombeamento de água e moagem de grãos.

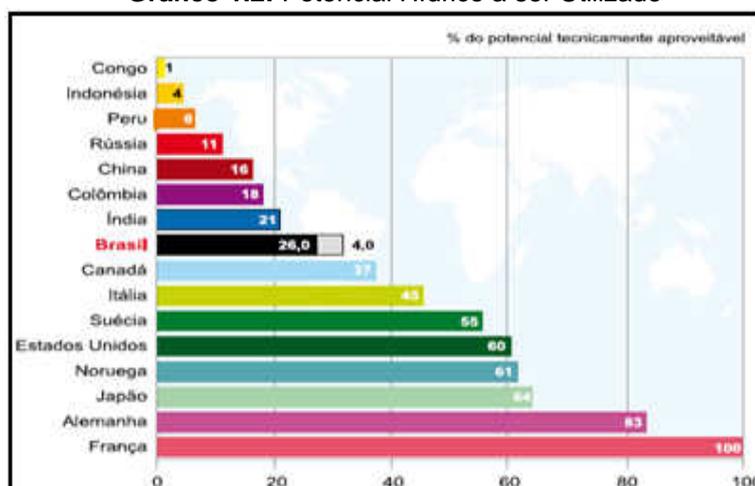
Esta tecnologia em comparação com os derivados de petróleo, e até mesmo com a energia nuclear, tem algumas vantagens, devido às seguintes características: disponibilidade de recursos, facilidade de aproveitamento e, principalmente, devido sua característica renovável.

A transformação de energia hidráulica em energia elétrica ocorre da seguinte forma: Primeiramente a energia potencial gravitacional disponibilizada (armazenada em uma barragem artificial) é convertida em energia cinética que ao passar pelas pás das turbinas é convertida em energia mecânica e como esta turbina está acoplada a um gerador, acontece finalmente à transformação de energia mecânica em energia elétrica.

Atualmente as hidrelétricas são as principais fontes geradoras de energia elétrica para diversos países e respondem por aproximadamente 17% de toda a eletricidade gerada no mundo.

No Brasil o cenário, em comparação com o a maioria dos países em torno do mundo, se apresenta de uma forma um pouco diferente, pois a contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional é da ordem de 90%. Este número é considerado muito bom e se explica primeiramente pelo enorme potencial hídrico do país aliado, também, pelo desenvolvimento das políticas governamentais que favorecem tal característica.

Analisando a Figura 1.2 podemos observar que o Brasil, mesmo com um bom uso de seu potencial hídrico, ainda tem muito disponibilidade a aproveitar de seus recursos. Isto quando comparado a países como a França, Alemanha e Japão que já se utilizam de todo, ou quase todo recurso disponível em seus territórios.

Gráfico 1.2: Potencial Hídrico a ser Utilizado

Fonte: CNI (2009).

O que se observa é que apesar do aumento de outras fontes (principalmente a cana de açúcar) e das restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos, a energia hidráulica continuará sendo, por mais algum tempo, a principal fonte geradora de energia elétrica Brasil. Pois esta matriz hidráulica continua em expansão devido aos novos projetos de hidrelétricas: Santo Antônio e Jirau em Porto Velho e Belo Monte no estado do Pará, que juntas ampliarão consideravelmente a geração hidroelétrica, disponibilizando assim uma maior quantidade de energia para o país que necessita demasiadamente deste insumo. A Tabela 1.1 demonstra uma comparação entre a matriz mundial e a brasileira. Podemos constatar uma grande vantagem do Brasil no sentido do uso da energia hidráulica.

Tabela 1.1: Matriz Energética Mundial X Brasil

Fonte de Energia	Mundo (2007)	Brasil (2009)
Petróleo	38,2%	37,8 %
Carvão	25,5%	4,8%
Gás Natural	23,4%	8,7%
Energia Nuclear	6,4%	1,4%
Hidrelétrica	6,4%	15,3%

Fonte: Agência Nacional de Petróleo e Ministério de Minas e Energia

As usinas hidrelétricas geralmente se utilizam de um sistema de resfriamento, para sua rede de trocadores de calor, este sistema é do tipo aberto, ou seja, a água nele utilizada, para servir como fluido de resfriamento é captado diretamente do reservatório á montante da usina, de forma bruta, sem nenhum tratamento químico e é devolvida ao rio á jusante da usina, isto se justifica devido ao grande volume diário utilizado, que torna muito oneroso e difícil o tratamento da água utilizada neste processo.

Na impossibilidade de se realizar este tratamento e devido às características da água, podem ocorrer os fenômenos de corrosão e/ou incrustação, a corrosão é um problema muito grave, pois pode causar inúmeras falhas de processo, por outro lado a incrustação é um problema quando tomamos o ponto de vista da eficácia da transferência de calor.

Segundo CAPUTO (2007), devido à ampla utilização de trocadores de calor nos processos industriais torna-se muito importante a preocupação com a minimização de custos que estes possam causar ficando importante tanto para o projeto quanto para sua operacionalidade.

Os depósitos que se acumulam na superfície interna das paredes dos tubos ou placas dos permutadores de calor diminuindo a condutibilidade térmica que é uma das propriedades mais importantes dos materiais de construção dos tubos e das placas destes equipamentos prejudicando assim a eficiência da troca térmica.

Os trocadores de calor têm a finalidade de transferir calor de um fluido para o outro. Tipicamente, são usados para refrigeração de fluidos, sendo os mais comuns, óleo e água e são construídos em tubos ou placas, onde, o fluido a ser refrigerado circula ao redor da área do tubo ou da placa, e pelo outro lado da placa ou do tubo circula o fluido refrigerante.

Os materiais mais utilizados para a construção de trocadores de calor são o cobre e alumínio, mas podem ser utilizados outros tipos de materiais para se adequar ao fluido, ou seja, o material não sofrer corrosão devido às características do fluido.

A eficiência de um trocador de calor depende de vários fatores e aspectos, mas podemos citar alguns com maior relevância e dentre estes consideramos principalmente o material de construção, a geometria empregada, e as características do fluido.

Contudo o problema destes sistemas são as incrustações provenientes dos próprios fluidos, estas incrustações causam inconvenientes de manutenção e operação diminuindo a produtividade dos equipamentos que dependem destes trocadores.

Neste trabalho veremos uma forma alternativa às atualmente utilizadas para combater este problema nos trocadores de calor que são utilizados em sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como finalidade somar o conhecimento científico e tecnológico ao processo de uma usina hidrelétrica, mais precisamente incrementando um novo processo de limpeza dos trocadores de calor do sistema de refrigeração do hidrogerador procurando aumentar sua disponibilidade e produtividade.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver estudo da aplicação de um processo de limpeza automático nos trocadores de calor do gerador de uma unidade geradora hidráulica de energia.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os elementos envolvidos no processo de resfriamento do gerador da unidade.

- Diagnosticar o procedimento que é atualmente utilizado para limpeza dos trocadores de calor do gerador da UGH.

- Analisar os dados de produtividade do equipamento utilizando o procedimento convencional de limpeza.
- Apresentar uma alternativa ao método convencional de limpeza dos trocadores de calor do gerador.
- Analisar os dados de produtividade depois de aplicado o novo processo de limpeza nos trocadores de calor da UGH.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento deste trabalho se justifica por motivos técnicos e principalmente econômicos, pois a demanda mundial por eletricidade é cada vez mais acentuada, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil.

E os equipamentos que geram esta eletricidade necessitam cada vez mais de confiabilidade e produtividade, assim a necessidade de se eliminar ao máximo possíveis causas de perdas de produção ou até mesmo parada de hidrogeradores.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

No capítulo I é apresentada a introdução ao assunto em questão, também são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos.

No capítulo II inicialmente é realizada uma revisão da literatura da origem das hidrelétricas e dos trocadores de calor em geral bem como sua aplicação e classificação e utilização também sobre os fenômenos que estes equipamentos estão sujeitos em especial à incrustação, pois essa tem sua parcela substancial na perda de eficiência de trocadores de calor.

No capítulo III é abordado o problema da perda de eficiência em trocadores de calor.

No capítulo IV são descritos os materiais e métodos utilizados na pesquisa, na caracterização da água, conseqüentemente o agente incrustante e no levantamento dos dados necessários e relevantes para o trabalho.

O capítulo V descreve os resultados e as discussões.

No capítulo VI são as conclusões do estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas.

CAPITULO II - REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O ESTADO DA ARTE EM TROCADORES DE CALOR E PERDAS DE EFICIÊNCIA DE HIDROLÉTRICAS

Diversos pesquisadores têm voltada sua atenção dedicando assim um bom tempo no estudo à problemática da perda da eficiência em trocadores de calor devido às incrustações.

Segundo Bejan (1996), Trocador de calor é um equipamento dedicado a promover a transferência de calor entre duas ou mais substâncias que apresentam temperaturas diferentes e a transferência de calor ocorre entre dois fluidos sendo que normalmente para que os fluidos não se misturem os dois escoamentos são separados por paredes sólidas que conhecemos como superfície de transferência de calor ou superfícies de troca de calor.

Araújo salienta a importância dos trocadores de calor na vida cotidiana do ser humano moderno.

Até mesmo no cotidiano da existência humana, os permutadores de calor estão presentes, influenciando sobre os mais diferentes aspectos. Assim, numa simples geladeira doméstica dois permutador de calor como será visto adiante, o mesmo acontecendo com o aparelho de ar condicionado; o aquecedor a gás usado para aquecimento de água no interior das residências é também um tipo de permutador de calor e da mesma forma o é o radiador de um automóvel (ARAUJO, 1978).

Os trocadores de calor sofrem com um fenômeno gradual denominado incrustação e este é observado na citação abaixo.

O desempenho dos trocadores de calor sob condições de serviço, especialmente na indústria, freqüentemente não pode ser previsto apenas por análise térmica. Durante a operação com a maioria dos líquidos e alguns gases, desenvolve-se gradualmente uma película de sujeira na superfície de transferência de calor. O depósito pode ser ferrugem, incrustação, detritos silicosos coque ou muitas outras coisas (KREITH, 1977).

Aprofundando-se mais no assunto veremos que o autor a seguir abordará um fator que é a perda de carga, este fator está intimamente ligado a questão do consumo de energia elétrica em redes de trocadores de calor.

Segundo Wu (2007), quando a camada de *fouling*¹ começa a crescer, esta tem característica como dito antes gradual, a transferência de calor diminui devido a baixa condutividade térmica da camada de incrustação. E ao mesmo tempo como a quantidade de passagem de fluxo diminui devido a restrição da área causando também perdas de carga.

Este inconveniente leva pesquisadores a buscar alternativas para minimizar as perdas.

Segundo Glemmestad (1998), a preocupação com a flexibilização e produtividade dos trocadores de calor já é um objeto de estudo de vários autores que pode ser observado desde os meados dos anos 80, estes buscam definir as áreas ideais de troca térmica.

A perda de funcionabilidade de um trocador de calor segundo Bott & Melo, (1997) , está relacionada com os depósitos indesejados de agentes incrustantes sob a superfície de transferência de calor gerando altos custos de manutenção na forma de limpezas.

Produtos de solubilidade de interação ânion/cátion são extremamente importantes no processo de formação da incrustação. O carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, sulfeto de ferro, sulfato de bário, e carbonato de bário todos possuem baixa solubilidade em sistemas aquosos (REBESCHINI, 2010).

O problema das perdas de produtividade se refletem em perdas econômicas, segundo Yeap (2004), as perdas devido a incrustação em trocadores de calor, são em uma refinaria de petróleo, um fator de grande impotância e preocupação.

O mais interessante é que segundo Radhakrishnan (2007), as perdas de eficiência que podem chegar até em 30% são responsáveis por um prejuízo de U\$ 16,5 Bilhões por ano se somadas do Reino unido e E.U.

¹ Acumulo de substâncias nas paredes interna ou externas de tubulações, causando aumento da resistência térmica e queda de pressão.

Segundo Daher (2003), uma forma de se minimizar o problema de incrustações por sais no processo de exploração de petróleo seria o uso de inibidores antiincrustantes.

No caso das hidrelétricas para usarmos tal artifício deveríamos ter um sistema fechado de água, conhecido comumente como sistema recirculante.

Os sistemas de resfriamento recirculante de água são utilizados com a finalidade de economizar água, além de serem eficientes e possibilitar um tratamento adequado contra corrosão, incrustação e proliferação de microorganismos (PAZ, 2005).

2.2 HIDRELÉTRICAS

Uma usina hidrelétrica é uma obra de engenharia das mais complexas onde se concentra além da obra civil um grande e complicado conjunto de obras e de equipamentos, que têm basicamente a finalidade de transformar a energia potencial hidráulica, geralmente de um rio, em energia elétrica.

O Brasil está entre os países que mais usam essa forma de se obter energia, e se encontra ao lado de países como Canadá, China e Estados Unidos, sendo, portanto, um dos maiores do mundo em geração e também em potencial hidrelétrico.

Como toda e qualquer forma de transformação de uma energia em energia elétrica as centrais hidrelétricas geram também algum tipo de impacto ambiental ou social, por exemplo, alagamentos e com isto geram desabrigados, pode também prejudicar a fauna, flora e meio ambiente.

Contudo a hidroeletricidade ainda é muito barata quando comparada com outras formas de geração tipo energia nuclear, eólica e também é vantajosa no que diz respeito à agressividade ambiental quando comparada a geração de energia através de derivados de petróleo ou carvão.

Um bom exemplo é a Usina Hidrelétrica de Tucuruí, localizada no estado do Pará na região da Amazônia brasileira é considerada uma das maiores obras da engenharia mundial sendo a maior usina 100% brasileira em potência instalada com

seus 8.370 MW, pois a usina de Itaipu não é totalmente brasileira e sim um acordo entre dois países considerada assim binacional, pertencendo ao Brasil e ao Paraguai, cada um com cinquenta por cento de participação.

A construção da hidrelétrica de Tucuruí se deu início em 1976, com a conclusão da primeira etapa em 1984 disponibilizou assim seus primeiros 4000 MW, com a finalização da segunda etapa em 2010 totalizou mais de 8000 MW.

Na Tabela 2.1 e segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) estas são as dez maiores usinas hidrelétricas do mundo, em capacidade de produção de eletricidade, observamos que a China tem a maior hidrelétrica do mundo a hidrelétrica de Três Gargantas seguida pela binacional Itaipu, vale ressaltar que quando a usina de Belo Monte no Pará for concluída esta será a terceira maior hidrelétrica do mundo, superando grandes usinas como a de Tucuruí, também localizada no Pará e a Guri na Venezuela.

Tabela 2.1: As Dez Maiores Usinas Hidrelétricas do Mundo

USINA	PAÍS	CAPACIDADE
Três Gargantas	China	18.200 MW
Itaipu	Brasil/Paraguai	14.000 MW
Guri	Venezuela	10.000 MW
Tucuruí	Brasil	8370 MW
Grand Coulee	EUA	6.464 MW
Sayano-Shushenskaya	Rússia	6.400 MW
Krasnoyars	Rússia	6.000 MW
Churchill Falls	Canadá	5.328 MW
La Grande 2	Canadá	5.328 MW
Bratsk	Rússia	4.500 MW

A Figura 2.1 mostra a representação esquemática de uma usina hidráulica, podemos observar os detalhes à posição do gerador, da turbina do reservatório dentre outros componentes de uma UGH.

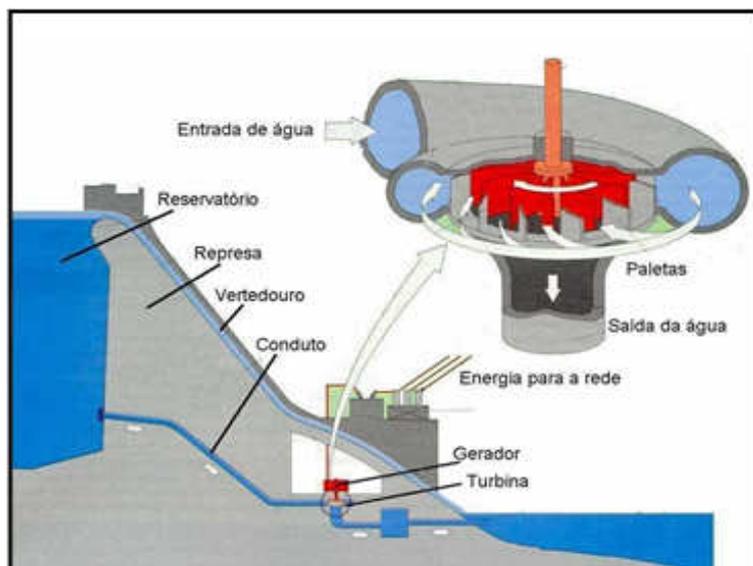


Figura 2.1: Esquema de uma Usina Hidrelétrica.

Fonte: InfoEscola, (2010).

2.2.1 RESERVATÓRIO

São componentes essenciais na concepção de uma usina hidrelétrica, contudo este é um dos os mais polêmicos assuntos quando falamos de usinas hidrelétricas, pois sabemos das suas conseqüências.

As hidrelétricas, com exceção de pouquíssimas usinas a fio d' água², utilizam reservatórios para equalizar as vazões de água que move as turbinas. Essas barragens são construídas preferencialmente em gargantas estreitas, com grande profundidade e relativamente pequena área inundada (GOLDEMBERG & LUCON,2008).

Também se pode ainda ter a possibilidade de se construir reservatórios sem esta preocupação do alagamento, tendo em vista apenas, o lado da geração de energia motivado pelo aumento gradativo da demanda energética que é impulsionada pelo desenvolvimento econômico e ao mesmo tempo em que a própria oferta de energia propulsiona este desenvolvimento formando um ciclo vicioso. A Tabela 2.2 mostra todos os reservatórios brasileiros bem como sua respectiva usina, ano de construção, localização, capacidade de geração, área alagada e sua capacidade de geração de energia.

² Usinas que aproveitam a força da correnteza dos rios sem precisar estocar água, criando assim grandes reservatórios.

Tabela 2.2: Usinas, Reservatórios e Áreas Alagadas Brasileiras.

RESERVATÓRIO					
Usina	Ano	Rio	Estado	Potência MW	Área km²
Água Vermelha	1978	Grande	SP	1396	647
Americana	1949	Atibaia	SP	34	11
Araras	1958	Acarau	CE	4000	96
Balbina	1989	Uatumã	AM	250	2360
Bariri	1966	Tietê	SP	143	63
Barra Bonita	1963	Tietê	SP	141	310
Boa Esperança	1970	Parnaíba	PI	108	310
Caconde	1965	Pardo	SP	80	31
Cachoeira Dourada	1966	Parnaíba	GO	443	74
Cajuru	1959	Pará	MG	7	27
Camargos	1958	Grande	MG	43	76
Campo Mourão	1969	Mourão	PR	8	11
Capivara	1976	Paranapanema	SP	640	515
Capivari-Cachoeira	1970	Capivari	PR	252	13
Curuá-Uma	1977	Curuá-Una	PA	30	78
Curumbá I	1994	Curumbá	GO	375	65
Emborcação	1982	Parnaíba	MG	1192	455
Ernestina	1954	Jacuí	RS	3,7	4
Estreito	1969	Grande	SP	1104	46
Euclides da Cunha	1960	Pardo	SP	109	1
Foz do Areia	1977	Iguaçu	PR	1674	148
Fontes	1908	Lages	RJ	134	31
Funil	1962	Das Contas	BA	30	4
Funil	1969	Par Do Sul	RJ	216	39
Furnas	1963	Grande	MG	1312	1450
General Sampaio	1935	Curu	CE	0.5	33
H. Borden	1996	Tietê	SP	880	88
Ibitinga	1969	Tietê	SP	132	114
Ilha Solteira	1969	Paraná	SP	3230	1077
Itaipú	1991	Paraná	BR/PY	12600	1360
Itaparica	1990	São Francisco	PE	2430	835
Itauba	1978	Jacuí	RS	50	17
Itumbiara	1980	Paranaíba	GO	2280	798
Jacuí	1963	Jacuí	RS	150	5
Jaguara	1970	Grande	SP	426	33
Jaguari	1971	Jaguari	SP	15	70
Limoeiro	1958	Mogi-Guaçu	SP	32	3
Maribondo	1975	Grande	MG	1440	438
Mascarenhas	1972	Doce	ES	123	4

Mogi-Guaçú	1998	Mogi-Guaçú	SP	7	11
Moxotó	1977	São Francisco	AL	440	93
Nilo Peçanha	1953	Par Do Sul	RJ	390	4
Nova Avanhandava	1982	Tietê	SP	347	210
Nova Ponte	1993	Araguari	MG	510	443
Paraibuna/Paratinga	1978	Paraibuna	SP	86	177
Paranoá	1960	Paranoá	DF	20	40
Paredão	1975	Araguari	AP	40	23
Passo Fundo	1972	Passo Fundo	RS	221	149
Passo Real	1973	Jacuí	RS	125	221
Paulo Afonso	1955	São Francisco	BA	3984	16
Pedra	1978	Das Contas	BA	23	101
Pedra do Cavalo	1994	Paranaguassu	BA	600	186
Pentecostes	1956	Canidé	CE	0.3	57
Peixoto	1957	Grande	MG	478	263
Pereira Passos	1961	Lages	RJ	105	1
Peti	1946	Santa Barbara	MG	9	6
Porto Colômbia	1973	Grande	MG	328	144
Porto Primavera	1995	Paraná	SP	1818	2250
Promissão	1975	Tietê	SP	264	530
Rosana	1988	Paranapanema	SP	320	217
Salto Grande	1958	Paranapanema	SP	71	16
Salto Osório	1975	Iguaçu	PR	1332	41
Salto Santiago	1980	Iguaçu	PR	1332	208
Samuel	1989	Jamari	RO	217	560
Serra da Mesa	1995	Tocantins	GO	1200	1784
São Simão	1978	Paranaíba	GO	1680	772
Segredo	1992	Iguaçu	PR	1260	83
Sobradinho	1979	São Francisco	BA	1050	4214
Taquaraçú	1990	Paranapanema	SP	505	105
Três Irmãos	1990	Tietê	SP	1292	951
Três Marias	1960	São Francisco	MG	517	1059
Tucuruí	1983	Tocantins	PA	42040	2430
Volta Grande	1974	Grande	SP	380	222
Xavantes	1970	Paranapanema	SP	8750	398
Xingó	1994	São Francisco	BA	5000	85

Fonte: Westin, (2007)

2.2.2 HIDROGERADORES

Os hidrogeradores são máquinas que convertem em energia elétrica a energia mecânica disponibilizada no eixo pela turbina hidráulica. No processo de conversão existem perdas de energia, que em máquinas de médio e grande porte atingem no máximo 2% da potência mecânica entregue pela turbina. Embora esse percentual seja pequeno, em termos absolutos isso representa perdas significativas. Dentre outras aquecem as partes ativas do gerador e requerem um sistema de resfriamento eficaz (PORTO 2008).

A Figura 2.2 é uma foto de um rotor de um Hidrogerador da Usina hidrelétrica de Itaipu.



Figura 2.2: Rotor de um Hidrogerador
Fonte: (Porto, 2008).

2.2.3 TURBINAS

Turbinas são basicamente máquinas destinadas a converter uma energia de um fluido qualquer em uma energia mecânica, porém existem vários tipos de turbinas e aplicações que são utilizadas para os mais variados fins, que vai desde medições de variáveis de processo, como os medidores de vazão a turbina até as turbinas que impulsionam as aeronaves. São muito utilizadas também na geração de energia elétrica como as turbinas a gás e as turbinas hidráulicas, existem alguns tipos que são mais utilizadas quando falamos em turbinas hidráulicas, estamos nos referindo as do tipo Pelton, Francis e Kaplan.

2.2.3.1 TURBINA PELTON

Tem como característica ser uma turbina que apresenta um escoamento tangencial, ideal para operar com altas quedas d'água e baixas vazões. O fluxo de água que vem do conduto fechado³ é direcionado para as conchas, que estão presas ao rotor, pelo bico injetor proporcionando movimento ao rotor que normalmente estará acoplado ao gerador.

A Figura 2.3 mostra um arranjo simplificado de um sistema de geração de energia utilizando uma turbina do tipo Pelton.

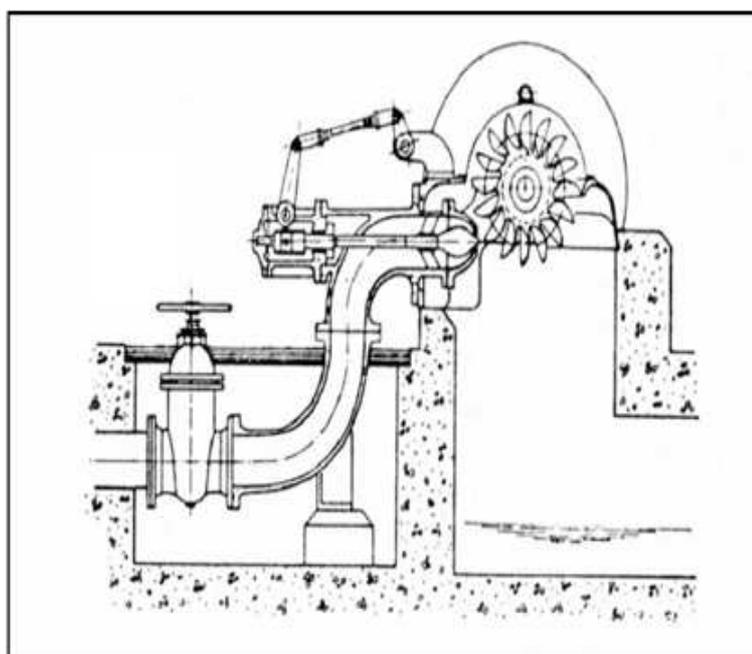


Figura 2.3: Turbina Pelton
Fonte: Duarte (2009).

2.2.3.2 TURBINA FRANCIS

Este tipo de turbina apresenta um escoamento radial, trabalha com grandes faixas de pressão e vazão, ao contrário da Pelton esta opera totalmente afogada. O controle de velocidade está no ângulo das pás do distribuidor⁴. Utilizada em hidrelétricas nacionais como é o caso da usina hidrelétrica de Tucuruí.

³ Tem a finalidade de conduzir a água captada do reservatório e conduzir para as conchas da turbina.

⁴ Composto de palhetas móveis que são acionadas por cilindros hidráulicos, o ângulo das palhetas controla a entrada de água e com isso a potência do gerador.

A Figura 2.4 é uma turbina tipo Francis em uma vista em perspectiva, este tipo de turbina é a utilizada na maior hidrelétrica do Brasil, Tucuruí.

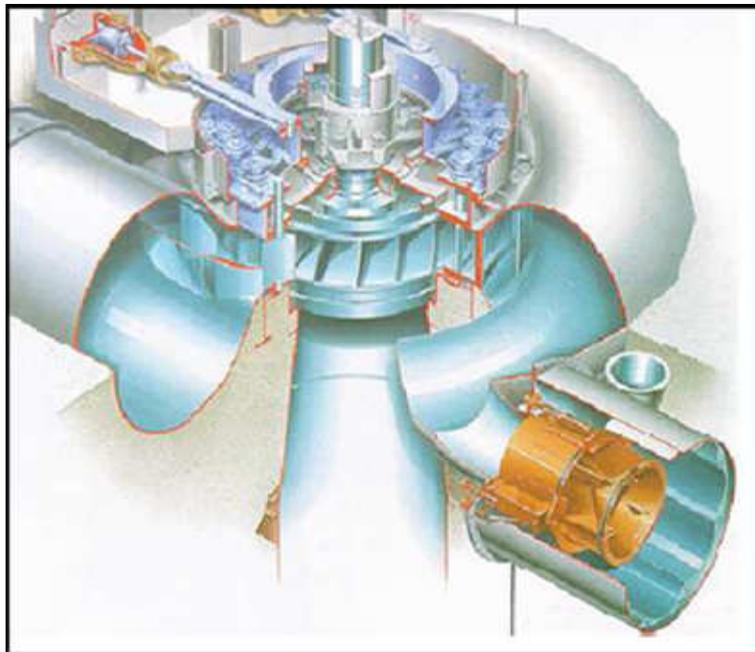


Figura 2.4: Turbina Francis em Perspectiva
Fonte: Duarte (2009).

2.2.3.3 TURBINA KAPLAN

Estas turbinas são caracterizadas pela possibilidade de se ajustar tanto o ângulo de abertura das do distribuidor, quanto o das suas próprias pás, devido estas características são adequadas para utilização em baixas quedas e altas vazões disponíveis.

São montadas dentro de uma caixa espiral⁵ que devido ao seu formato, em espiral, é reponsavel para aumentar a velocidade do fluxo de água. A Figura 2.5 mostra uma turbina do tipo Kaplan em Corte.

⁵ Estrutura civil da Usina em forma de uma tubulação que envolve o rotor da turbina, tipo um caracol.

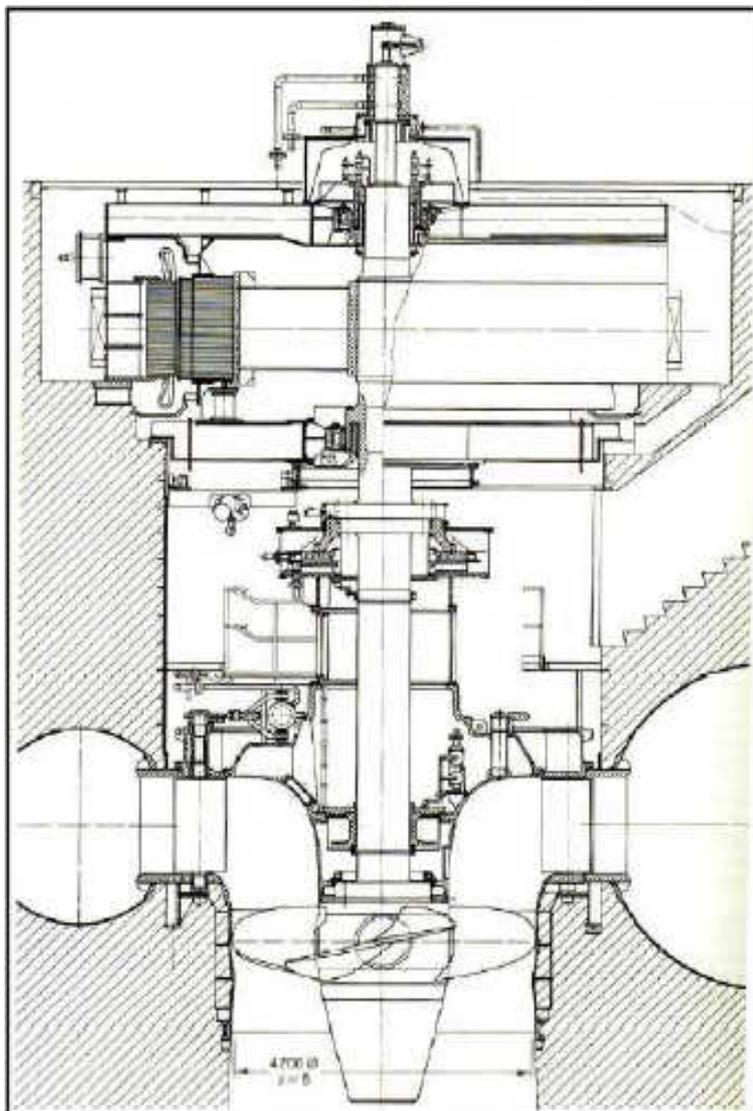


Figura 2.5: Turbina Kaplan em Corte
Fonte: Duarte (2009).

2.3 TROCADORES DE CALOR

Trocadores de calor são equipamentos que possibilitam a transferência de calor entre um fluido mais quente e um fluido frio geralmente mediante a interposição de uma parede, fabricada de um material com características de boa condutividade térmica podendo ser apresentada em forma de uma placa, tubos, etc. Porém existem casos em que a parede não existe, e estes equipamentos são denominados de contacto direto.

A Figura 2.6 mostra uma foto de um típico trocador de calor de casco e tubos.



Figura 2.6: Típico Equipamento Trocador de Calor
Fonte: Incropera & Witt (2003).

Os trocadores de calor são classificados de varias maneiras: Caldeiras, condensadores, evaporadores, permutadores carcaça-tubo, regeneradores, de placas, compactos, dentre outros. E são empregados em diversas aplicações industriais e até mesmo em residências, por exemplo: Ar condicionado, refrigeração e criogenia, centrais térmicas, indústria química, indústria automóvel, energia solar, usinas hidrelétricas indústrias petrolíferas automóveis e etc.

2.3.1 QUANTO A SUA CONSTRUÇÃO

São classificados quanto ao número de fluidos; arranjo de fluxos; passagens simples; fluxos paralelos, opostos e cruzados e também são classificados quanto ao processo de transferência que pode ser por contacto direto ou indireto, os tipos construtivos mais conhecidos e utilizados são:

- Casco e Tubos

Segundo (C. O. Bennett, 1978) este é um dos tipos mais comuns e utilizados trocador de calor presente em diversos tipos de indústria, são construídos com um número de tubos paralelos envolvidos por uma carcaça e por essa razão recebem esta denominação, trocadores casco e tubos estão presentes desde refinarias a fabricas de produtos alimentícios e encontram-se também em usinas hidrelétricas onde pode estar resfriando óleo lubrificante de mancais ou de sistemas hidráulicos.

Este tipo de trocador pode ser aplicado em aplicações onde requeira altas pressões, sua característica de fabricação é basicamente um vaso de pressão que chamamos de casco e um feixe de tubos dentro do casco, seu funcionamento consiste em um fluido passar por dentro dos tubos e o outro fluido passa por fora dos tubos, no casco, com isto se processa a transferência de calor entre os dois fluidos, pois os tubos são confeccionados em material bom condutor em geral cobre ou alumínio e suas ligas. A Figura 2.7 apresenta o esquema de um trocador de calor casco e tubos.

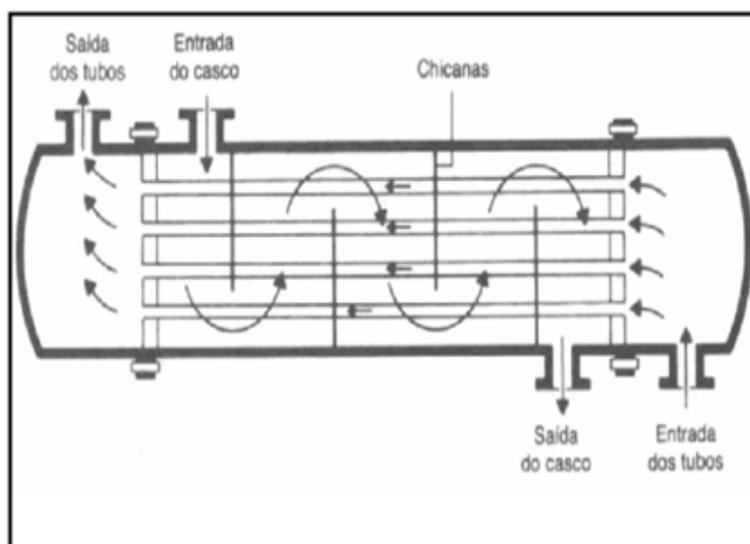


Figura 2.7: Esquema de um Trocador de Calor Casco e Tubos
Fonte: Incropera & Witt (2003).

- Resfriadores a Ar

Os resfriadores de ar também conhecidos como radiadores, são trocadores de calor amplamente utilizados em automóveis, mas estes também têm seu uso industrial, nas usinas hidrelétricas estes são utilizados para resfriar o ar quente que trocou calor com as bobinas do estator do gerador e foi impulsionado pelo rotor, forçando assim sua passagem por entre os tubos dos radiadores, que no seu interior passa a água captada do reservatório, e com isso ocorre à troca térmica entre estes fluidos, seu princípio de funcionamento é o mesmo do casco e tubos, porém ele não apresenta o casco, seu feixe tubular fica exposto para que, comumente, o ar seja forçado a passar por entre eles de uma forma perpendicular e a água por dentro dos tubos, proporcionando assim a troca de calor.

A Figura 2.8 mostra uma foto de um típico radiador industrial ar-água utilizado para resfriar o ar utilizando como fluido de resfriamento a água.



Figura 2.8: Radiador Industrial
Fonte: Brunnschweiler (2010).

- Trocadores de Calor a Placas

Outro tipo de trocador de calor muito utilizado na indústria é o trocador de calor a placas, este é formado basicamente por varias placas esbeltas que podem ser onduladas para proporcionar melhor eficiência de troca térmica, estas estão levemente separadas, este trocador oferece uma grande área de troca de calor, pois é por este espaçamento entre as placas que os fluidos sofrem a troca de calor, enquanto um passa por um lado o outro passa pelo outro lado fazendo assim uma possibilidade de um equipamento de menor porte para uma boa troca de calor, por este motivo às vezes este tipo de trocador pode ser mais interessante do que um de casco e tubos.

Segundo Guérin (2006), os principais problemas enfrentados pelos usuários destes trocadores estão relacionados com incrustação, corrosão e resistência mecânica.

A Figura 2.9 mostra um esquema de um trocador de calor a placas, verificamos que é um equipamento de troca térmica indireta, onde o liquido quente

em vermelho passa por um lado da placa, que pelo fenômeno da condução, fornece calor, para o outro fluido que esta do outro lado da placa, representado em azul.

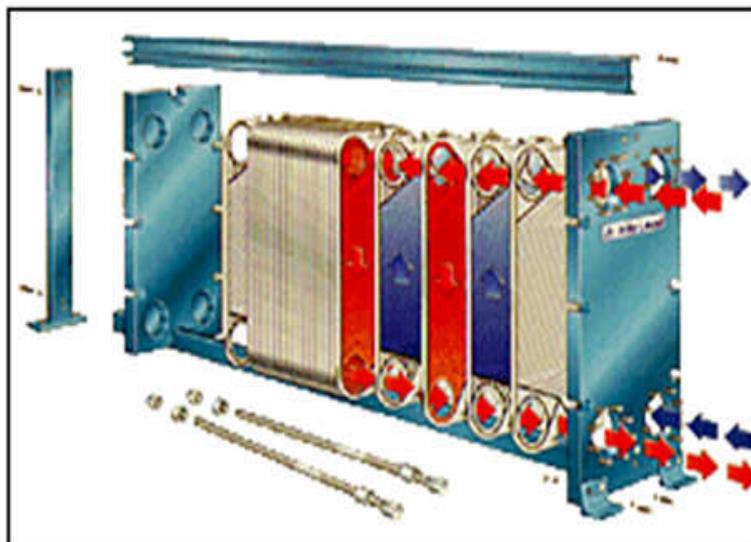


Figura 2.9: Esquema de um Trocador de Calor a Placas
Fonte: UFRGS (2010).

- Permutadores Espirais

Os trocadores de calor em espiral tem seu nome referenciando sua forma construtiva que pode ser em relação à disposição dos seus tubos que são de uma forma helicoidal, contudo o que mais se observa é um par de superfícies planas com dois canais de formato espiralados.

Uma vantagem deste tipo de trocador é deste ocupar pouco espaço e ainda apresentar uma pequena queda de pressão dos fluidos, propiciando economias operacionais, outra vantagem é que este tipo de trocador de calor pode ser aplicado em fluidos que contenham sólidos, pois estes toleram de forma a amenizar um processo incrustante e uma das maiores vantagens é a praticidade de seu processo de limpeza.

A Figura 2.10, é uma demonstração do fluxo dos fluidos quentes e frio em um trocador de calor em espiral, observa-se a entrada 1 em vermelho, simbolizando fluido quente, e sua saída 1 em uma cor tendendo ao azul, mostrando assim mudança de temperatura para menos, enquanto a entrada 2 em azul, simbolizando

um fluido mais frio, e sua saída 2 em uma cor tendendo ao vermelho, demonstrando assim mudança de temperatura para mais.

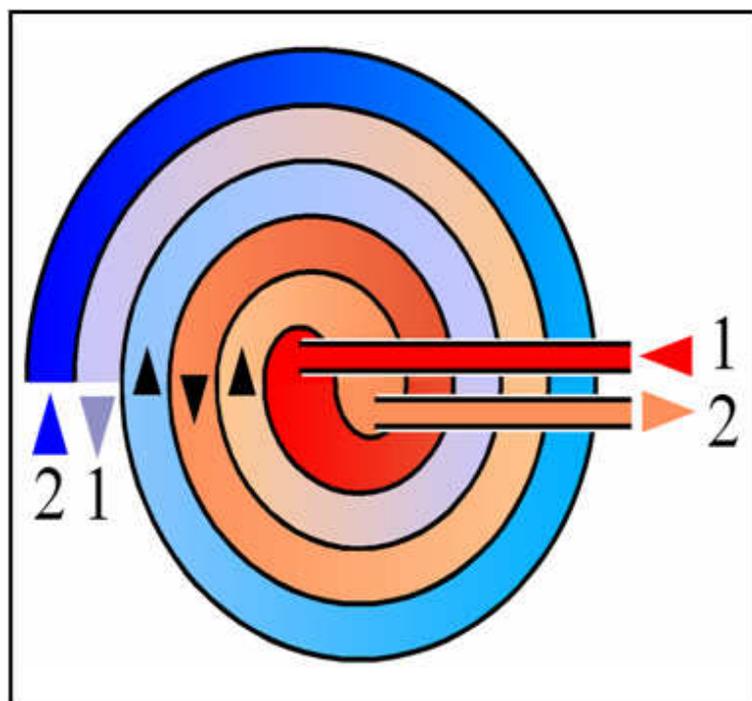


Figura 2.10: Esquema de Trocador Espiral
Fonte: Wikipédia, (2010).

2.3.2 QUANTO A SUA FINALIDADE

Os trocadores de calor também são classificados quanto a sua finalidade, ou seja, sua função dentro de um sistema, estas finalidades são apresentadas tais como:

- Aquecedor

Aquece um fluido do processo, recebendo calor sensível normalmente de vapor d'água, ou de outro fluido quente disponível. Pode haver ou não condensação do fluido quente, neste caso é um aquecedor para gás natural do tipo indireto onde o fluido aquecido é a água que transmite calor para o gás através de um banho nas serpentinas.

Na figura 2.11 uma foto de um aquecedor de banho indireto utilizado para aquecimento de gás natural.



Figura 2.11: Aquecedor de Gás Natural

- Evaporador

Vaporiza um líquido, recebendo calor normalmente de vapor d'água, ou de outro fluido quente disponível. Opera em conjunto com torres de processamento, vaporizando parte dos seus produtos de fundo.

Pode também ser utilizado em refrigeração residencial, aplicado nos condicionadores de ar, e em aplicações industriais para transformar um líquido em gás, por exemplo, no caso do Nitrogênio (N_2) que quando transportado em grandes quantidades deve estar na forma líquida, devido ao seu elevado volume se for transportado na forma gasosa, então necessita ser evaporado para voltar ao estado gasoso para a aplicação desejada.

Na Figura 2.12 uma foto de um evaporador utilizado no processo de re gaseificação de nitrogênio.

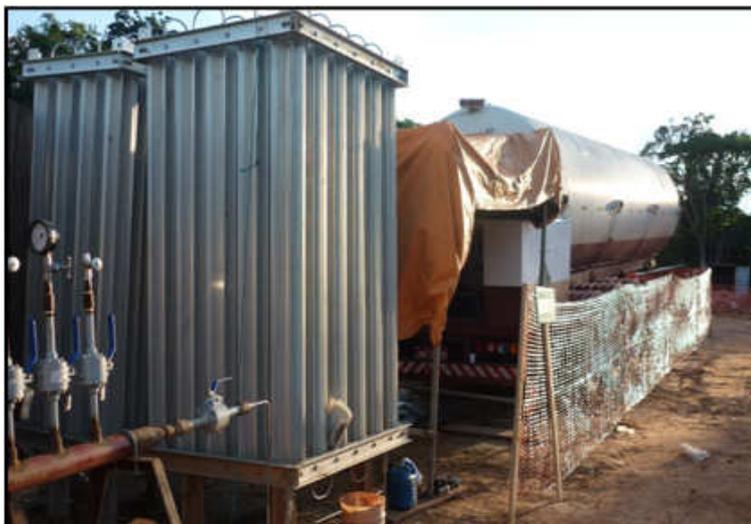


Figura 2.12: Processo de Gaseificação de Nitrogênio Utilizando Evaporador

- Gerador de Vapor

Gera vapor d'água recebendo energia em forma de calor de outro fluido oriundo de outro processo tipo co-geração. Na figura 2.13 uma caldeira industrial.

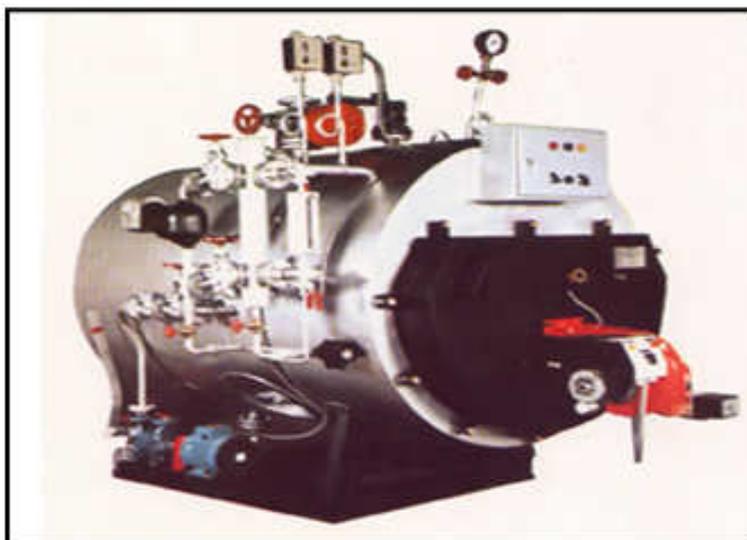


Figura 2.13: Gerador de Vapor
Fonte: Vaporel, (2011)

- Condensador

Condensa vapores cedendo calor, por exemplo, para água é empregado para recuperação de vapores de colunas de destilação, bem como para condensação do vapor exaurido por turbinas, reduzindo a pressão de descarga das

mesmas, também utilizado amplamente para refrigeração de ambientes, compondo as unidades de refrigeração tanto no uso residencial como comercial e industrial. Na Figura 2.1 uma unidade condensadora residencial.



Figura 2.14: Unidade Condensadora de Condicionador de Ar Residencial

Os processos que se utilizam de trocadores de calor são diversos, e existe um problema ligado a eles, o que se conhece como perda de eficiência do trocador de calor e conseqüentemente a perda de produtividade do sistema no qual este esteja inserido, este fenômeno já é motivo de vários estudos.

CAPITULO III – PERDAS DE EFICIÊNCIA EM TROCADORES DE CALOR

3.1 ANÁLISE DAS PERDAS DE EFICIÊNCIA EM TROCADORES DE CALOR

Inúmeros estudos abordam as perdas técnicas e econômicas ocasionadas pelo baixo desempenho destes equipamentos, ou seja, perda de eficiência, e este parâmetro dependem de variáveis envolvidas no processo que são muitas.

Segundo KAKAÇ (2002), a incrustação, ou *fouling*¹, pode ser definida como o acúmulo de substâncias não desejadas na superfície de uma área de troca de calor, pode ocorrer em sistemas naturais ou sintéticos, para um melhor entendimento pode ser comparado com o depósito de colesterol nas artérias e proliferação de tecido conjuntivo que forma uma placa nas suas paredes. Este fenômeno aumenta a resistência térmica da superfície de troca de calor, provoca queda de pressão, tendo que dependendo do caso aumentar o bombeamento do fluido para corrigir estas perdas, na Figura 3.1 verifica-se este fenômeno.

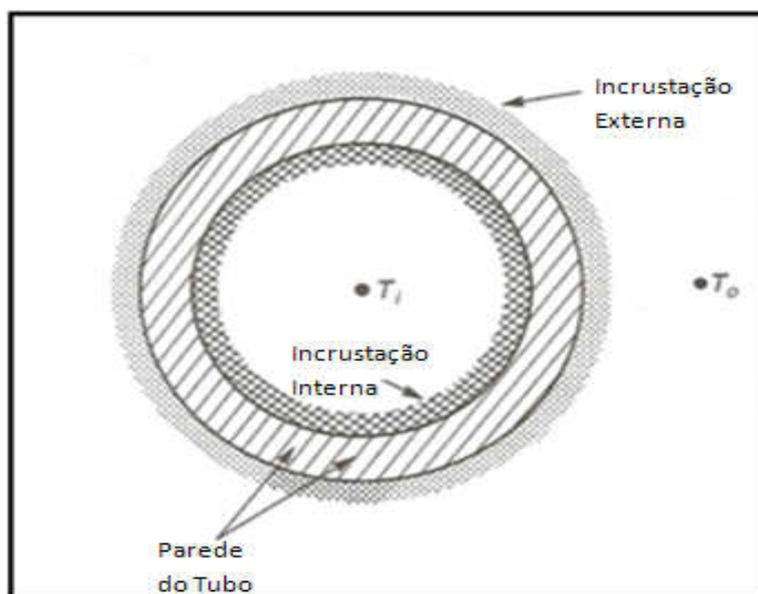


Figura 3.1: Tubo Incrustado em Corte
Fonte: Kakaç, (2002).

¹ Acúmulo de substâncias nas paredes interna ou externas de tubulações, causando aumento da resistência térmica e queda de pressão.

Ainda segundo KAKAÇ (2002), a análise térmica de um trocador de calor é regida pela conservação de energia, em que o calor liberado pelo fluido quente é igual ao calor ganho pelo fluido frio e a taxa de transferência de calor está relacionada com a geometria do trocador e o fluxo, como:

$$Q = U \times A \times \Delta T \times f \quad (3.1)$$

Q = taxa de energia transferida Watt (W)

U = coeficiente global de transferência de calor [W/(m²·K)]

A = área (m²)

ΔT = diferença de temperaturas (K)

f = fator de correção da DTML

Contudo durante a operação normal de um trocador de calor, as superfícies de troca de calor estão constantemente sujeitas a deposição de impurezas e estas impurezas aumentam a resistência de transferência de calor entre os fluidos quentes e frios do sistema, este efeito pode ser tratado pela introdução de uma resistência térmica adicional, R_f , e pode ser representado como:

$$R_f = \frac{1}{(UA)_f} - \frac{1}{(UA)_{cl}} \quad (3.2)$$

Onde U é o coeficiente global de transferência de calor e A é a área de transferência de calor. Os índices f e cl representam o trocador sujo e limpo, respectivamente, f inclui a resistência térmica em ambos os lados do trocador de calor.

- Efeitos do *Fouling* na Transferência de Calor

Quando se observa a Figura 3, esta representa o acúmulo de incrustação sobre as superfícies internas e externas de um tubo circular, fica evidente que esta camada aumenta o isolamento térmico sobre a superfície de troca de calor, para

estas condições, com a inclusão dos efeitos da incrustação na superfície de troca de calor, o coeficiente global de transferência de calor pode ser representado como:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{UA} = \frac{1}{UcAc} = \frac{1}{UhAh} = \\
 &= \frac{1}{(\eta_0 hA)_c} + \frac{R_{f,c}}{(\eta_0 A)_c} + R_w + \frac{R_{f,h}}{(\eta_0 A)_h} + \frac{1}{(\eta_0 hA)_h}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Onde c e h referem-se aos fluidos frio e quente respectivamente, R_w é a resistência condutiva, R_f é o fator de incrustação que depende do fluido, η_0 é denominada eficiência global da superfície ou efetividade de temperatura de uma superfície.

- Efeito da Incrustação na Queda de Pressão

Segundo KAKAÇ (2002), a incrustação obriga a retirada do trocador de calor para manutenções, pois além da perda de eficiência de troca térmica também ocorre uma queda excessiva da pressão, por menor que seja a espessura da camada de incrustação pode afetar o fluxo, tendo-se que aumentar a pressão de bombeamento aumentando os custos operacionais referentes ao consumo energético.

Uma camada de incrustação na superfície de troca de calor de um trocador de calor altera a área de passagem do fluido através do diâmetro interno, com isso aumenta a perda de carga, que consiste basicamente em uma perda de energia do fluido, com o agravante que esta energia perdida pode se transformar em energia na forma de calor, sendo dissipada no próprio fluido e com isto diminuindo ainda mais eficiência do trocador de calor. A queda de pressão pode ser calculada pela conhecida equação de *Darcy-Weisbach*²:

² Equação da perda de carga desenvolvida e conhecida pelo nome de dois Engenheiros Hidráulicos que a desenvolveram nos meados do século 19.

$$\Delta P = f \cdot \rho \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \frac{V^2}{2} \quad (3.4)$$

Onde ΔP = Perda de carga ao longo do comprimento do tubo (Pa), f é o fator de atrito (adimensional), L é o comprimento do tubo (m), V é a velocidade do líquido no interior do tubo (m/s) e D é o diâmetro interno do tubo (m).

. As quedas de pressão em situações, onde trocadores de calor estejam com as superfícies sujas ou limpas também podem ser relacionadas como:

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta P_c} = \frac{f_f}{f_c} \frac{d_c}{d_f} \left(\frac{u_f}{u_c} \right)^2 \quad (3.5)$$

Ao considerarmos que o fluxo de massa ($m^* = u_m \rho A$) com as condições sujas e limpas iguais, a equação 3.5 pode ser modificada por:

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta P_c} = \frac{f_f}{f_c} \left(\frac{d_c}{d_f} \right)^2 \quad (3.6)$$

O fator de incrustação pode ser relacionado com a condutibilidade térmica K_f e a espessura da incrustação t_f como:

$$R_f = \frac{t_f}{K_f} \quad \text{Para uma parede plana} \quad (3.7a)$$

$$R_f = \frac{d_c \ln(d_c / d_f)}{2\pi k_f} \quad \text{Para uma parede de tubo cilíndrico} \quad (3.8b)$$

Em condições incrustadas, d_f , pode ser obtida pelo rearranjo da Equação (3.8b).

$$d_f = d_c \exp\left(-\frac{2\pi k_f R_f}{d_c}\right) \quad (3.9)$$

E a espessura da incrustação, t_f , é expressa como:

$$t_f = 0.5d_c \left[1 - \exp\left(-\frac{2\pi k_f R_f}{d_c}\right) \right] \quad (3.10)$$

- Aspectos da Incrustação

Ainda segundo KAKAÇ (2002), o *fouling* é um dos principais problemas ainda não resolvido na transferência de calor. Existem grandes perdas financeiras no setor industrial relacionadas ao *fouling* e apesar de vários estudos já tenham sido realizados sobre este tema ainda não se encontrou uma solução definitiva para a problemática.

- Previsão da Incrustação

O processo de incrustação é um processo gradual que se processa em função do tempo, nos projetos de trocadores de calor é determinado um valor constante de resistência da incrustação, R_f , interpretado como o valor alcançado em um tempo a qual o trocador necessitará ser limpo. Para determinar os períodos de limpeza é necessária como a incrustação progride no tempo de funcionamento, esta informação também é necessária para o correto funcionamento do trocador de calor esta variação em relação ao tempo pode ser expressa como a diferença entra a taxa de depósito, Φ_d , e a taxa de remoção.

$$\frac{dR_f}{dt} = \Phi_d - \Phi_r \quad (3.11)$$

O comportamento de Φ_d e Φ_r dependem de um grande número de parâmetros, pode-se representar este comportamento como uma curva de *fouling* em relação ao tempo, e o formato da curva se relaciona com os processos ocorridos durante o processo de incrustação.

Na Figura 3.2 observam-se quatro modos conhecido de incrustação em relação ao tempo de funcionamento de trocadores de calor.

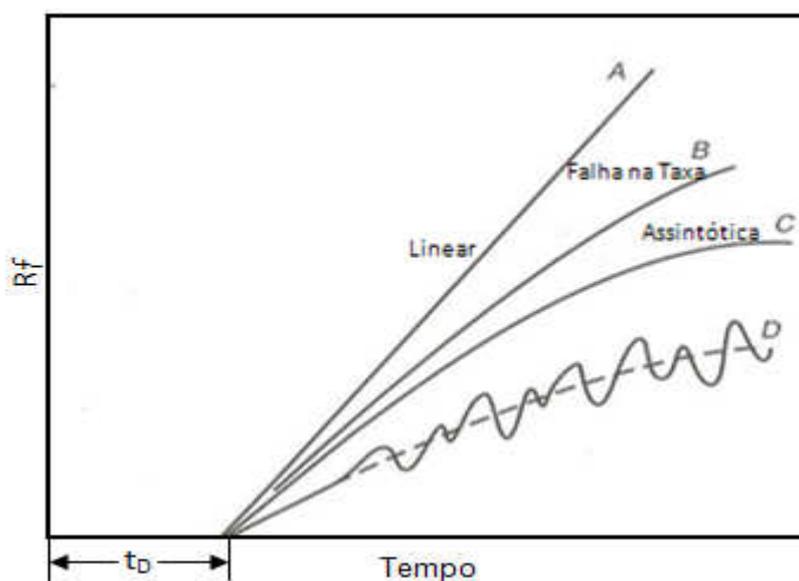


Figura 3.2: Gráfico *Fouling* em Função do Tempo
Fonte: Kakaç 2002.

Se a taxa de deposição, segundo KAKAÇ (2002), for constante e a de remoção muito menor, então a curva da incrustação em relação ao tempo assumirá uma função linear exemplificado na curva A da Figura 3.2, este tipo de incrustação tem características muito aderente e continua aumentando até a necessidade de parada do equipamento para limpeza. Quando a taxa de depósito é constante e a taxa de remoção proporcional a ela então deve se observado uma curva tipo a C, assintótica, ou seja, algo está deteriorando a camada de incrustação tal situação ocorre onde apresenta deposições suaves que podem se desprender facilmente da superfície de troca de calor, a curva B situa-se entre as curvas A e C, ou seja, um

comportamento intermediário, enquanto a curva D apresenta variações para mais ou para menos em função do tempo este tipo de curva é típica de torre de resfriamento.

O coeficiente global de transferência global de um trocador calor sob condições de operação, especialmente na indústria de processo, em geral não pode ser calculado somente a partir da análise térmica. Durante a operação e com a maioria dos líquidos e alguns gases, um depósito é formado gradualmente sobre a superfície de transferência de calor... Seu efeito, denominado incrustação, é aumentar a resistência térmica. (KREITH & BONH, 2003).

Ainda segundo Kreith & Bonh (2003), podemos determinar o fator de incrustação, R_d , conhecida como resistência térmica do depósito, realizando testes de desempenho no trocador de calor antes da contaminação e repetido após um período determinado de funcionamento, a partir da relação:

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U} \quad (3.12)$$

Onde:

U = coeficiente global de transferência de calor do trocador não contaminado.

U_d = coeficiente global de transferência de calor após a contaminação

R_d = fator de contaminação (ou resistência térmica unitária) do depósito.

Bott (1995), também afirma que a relação entre incrustação em trocadores de calor e perda de eficiência no processo vem sendo motivo de vários estudos.

Como as usinas hidrelétricas geralmente se utilizam de um sistema de resfriamento do tipo aberto, ou sistema de uma só passagem, nestes sistemas a água que é o fluido refrigerante é captada diretamente do reservatório a montante da

usina, circula pelos trocadores e é devolvida para o rio a sua jusante da usina, isto só é possível devido à grande disponibilidade de água que esta dentro da qualidade exigida no processo, porém devido a esta grande quantidade não há como realizar um tratamento químico necessário nesta água para que não haja problemas de incrustação, este causado por material de origem orgânico e/ou inorgânico.

3.1.1 INCRUSTAÇÃO ORGÂNICA

A incrustação orgânica é um dos fatores responsáveis pela perda da capacidade térmica de um trocador de calor, esta incrustação é ocasionada pelo desenvolvimento microbiológico na superfície de transferência de calor isto devido à água de resfriamento de uma usina não ser devidamente tratada, isto proporciona diversas perdas tanto de origem técnica quanto econômica, pois toda vez que o limite de incrustação ultrapassa ao admissível tem-se a necessidade de parar o equipamento e se este não for redundante, há também a necessidade de parar todo o processo produtivo ao qual ele esteja envolvido.

Segundo Trovati (2005), podem-se citar os seguintes problemas causados pelo acúmulo de microrganismos nas águas de resfriamento, proporcionando assim perdas tanto no sentido econômico quanto técnico no desempenho destes sistemas:

- Depósitos

Acumulo de depósitos sobre a superfície de troca térmica de equipamentos responsáveis por troca de calor entre fluidos que podem diminuir a transferência de calor entre os fluidos, ocasionando assim perdas econômicas e técnicas.

- Entupimento

Este processo pode entupir os tubos dos trocadores ou até mesmo os tubos e as válvulas da linha de alimentação de água, causando uma diminuição da vazão

fornecida para o trocador de calor ocasionando um prejuízo ao seu funcionamento e levando também a perdas de produtividade.

- *Biofouling*

Algumas substâncias orgânicas excretadas por alguns seres podem combinar-se com material inorgânico como os sais e formar incrustações muito aderentes nas paredes do equipamento, este processo é conhecido como *biofouling*.

Este fenômeno é responsável por perdas de eficiência dos trocadores de calor de diversos tipos, inclusive dos que são objeto de estudo deste trabalho, causando assim incrustações, aumentando a resistibilidade do material de construção dos trocadores e conseqüentemente a perda de eficiência do processo no qual este equipamento esteja inserido. Em alguns casos além desta perda o *biofouling* pode acelerar o processo de corrosão do material.

A Figura 3.3 apresenta registro em MEV de *Biofouling*.

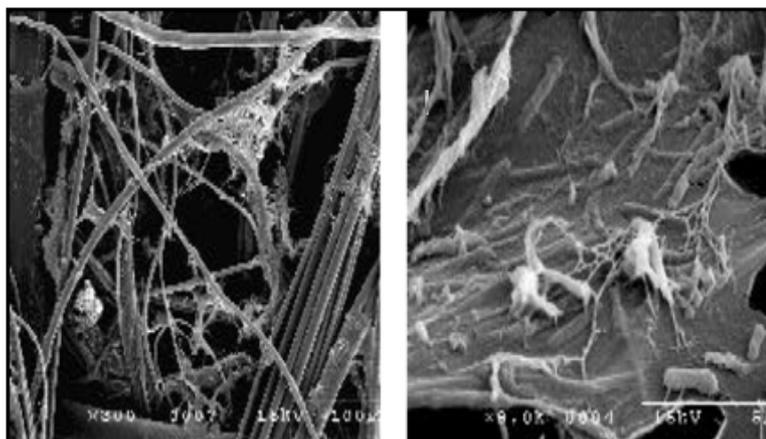


Figura 3.3: *Biofouling* registrado em MEV

Fonte: Trovati (2005).

3.1.1.1 TIPOS DE MICROORGANISMOS

Os diversos tipos de microorganismos apresentam algumas diferenças quanto a sua morfologia e fisiologia, e com isso apresentam diversos tipos de

problemas. No Quadro 3.1 serão classificados alguns microorganismos quanto ao tipo, fonte de energia utilizada e problemas que estes podem causar.

Quadro 3.1: Classe de Microorganismos, Nutrientes e Danos.

Organismo	Classificação	Fontes de Energia e Nutrientes	Problemas
Bactérias aeróbicas ou anaeróbicas	Formadoras de biofilme	Diversos compostos orgânicos e inorgânicos fazem quimiossíntese	Depósitos densos e aderentes
	Depositantes de ferro		Oxidação do ferro e deposição de óxidos insolúveis
	Redutoras de Sulfato		Reduzem sulfatos a sulfetos causando severa corrosão
	Anaeróbicas corrosivas		Secretam substâncias corrosivas
Fungos	Leveduras e fungos	Material orgânico	Degradação da madeira e obstrução de tubos e válvulas
	Filamentosos		
Algas	Unicelulares e superiores	Luz solar	Obstrução de tubos e válvulas e deposição

Fonte: Trovati (2005).

Podemos classificar os microorganismos de acordo com as suas necessidades de oxigênio, que podem ser divididos em aeróbios que se utilizam do oxigênio dissolvido para o seu metabolismo e anaeróbios que se proliferam em ambientes que não tem oxigênio. Ainda existe outra variação a dos microorganismos facultativos, que são capazes de crescer em meios anaeróbios e aeróbios.

Também podemos verificar uma classificação entre os autotróficos que se utilizam do dióxido de carbono como fonte de carbono ou heterotróficos que se utilizam de material orgânico para conseguirem carbono.

De acordo com a fonte de carbono utilizada em seu metabolismo, produção energia e síntese de matéria orgânica, os microorganismos podem ser classificados em autotróficos (utilizam o dióxido de carbono como fonte de carbono) ou heterotróficos (utiliza matéria orgânica como fonte de carbono). Os primeiros podem ser quimiossintéticos (obtem energia da oxidação de compostos inorgânicos; um exemplo é a *Gallionella*, uma das bactérias oxidantes do ferro) ou fotossintéticos, obtendo energia da radiação solar; sintetizam matéria orgânica e material celular a partir do dióxido de carbono e da água, produzindo o oxigênio molecular; um exemplo são as algas que causam problemas em torres de resfriamento (VIDELA, 2003).

3.1.1.2 FATORES QUE POTENCIALIZAM A FORMAÇÃO DE *BIOFOULING*

Segundo Gentil (2003), algumas condições de processo são fatores que têm grande influência no crescimento microbiológico, mas neste trabalho, em específico, serão relatados apenas os que são relevantes para o estudo em questão.

- Oxigênio Dissolvido

A grande quantidade de oxigênio dissolvido propicia a proliferação de bactérias aeróbicas, contudo a pequena quantidade como é no caso de grandes quantidades de águas paradas, tipicamente vista em hidrelétricas podem desenvolver os microorganismos anaeróbicos.

- Temperatura

A temperatura é uma variável importante a ser observada quando se estuda os processos incrustantes, pois se sabe que as bactérias de um modo geral se potencializam em temperaturas entre 30 a 40°C isto indica que, os trocadores de calor que trabalham nesta faixa de temperatura estão mais predispostos a sofrerem com este fenômeno.

- pH

O *pH* alto, acerca de 11 impede ou minimiza o aparecimento de alguns tipos de bactérias como as bactérias redutoras de sulfato³.

- Velocidade do Fluxo

A velocidade do fluxo interfere nas características da incrustação, em velocidades altas os biofilmes são mais densos, menos volumosos e mais aderentes

³ Bactérias que utilizam o sulfato como agente oxidante, reduzindo-o a sulfeto.

enquanto os que são formados em velocidades baixas se caracterizam por serem mais volumosos, porém são facilmente eliminados.

3.1.2 INCRUSTAÇÃO INORGÂNICA

As incrustações inorgânicas são deposições que se precipitam na superfície dos trocadores de calor e que acontecem devido à deposição de materiais, minerais, de forma isolada ou combinando-se e estes materiais tem como características, baixa solubilidade como exemplo podemos citar o ferro, cálcio, dentre outros.

Segundo Marques *et al* (2001), incrustações podem ser definidas como compostos químicos de natureza inorgânica, inicialmente solúvel em soluções salinas, e que precipitam podendo se acumular em equipamentos. Na Figura 3.4 pode-se observar em uma foto em MEV a formação típica de sais incrustantes.

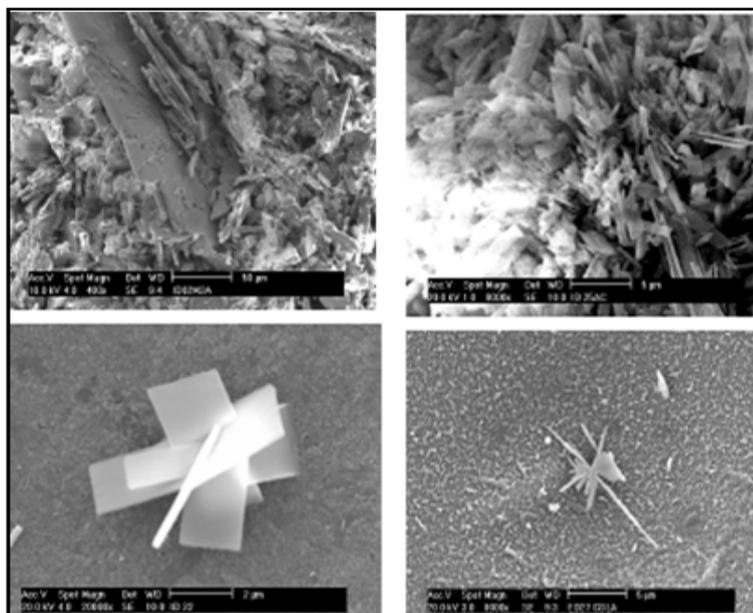


Figura 3.4: Incrustação por Sais
Fonte: Trovati (2005).

Na Figura 3.5 podemos observar uma foto de tubulações seccionadas registrando este fenômeno, percebe-se nitidamente que onde se têm agentes que potencializam o aparecimento de incrustantes este ocorre de maneira mais intensa e danosa ao equipamento, neste caso, segundo Gentil (2003), a incrustação teria sido

maximizada pelo emprego de uma água com dureza carbonática elevada, isto nos quatro tubos, podemos também verificar que o tubo da direita está com depósitos de oxido de ferro.



Figura 3.5: Incrustação Inorgânica
Fonte: Gentil (2003).

CAPITULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os equipamentos, parâmetros e ferramentas utilizadas na aplicação de um novo procedimento de limpeza para trocadores de calor tipo radiador de geradores de usinas hidrelétricas, isto, sem a necessidade de abrir os trocadores e conseqüentemente sem a necessidade de parar a UGH, procedimento que, causa perdas de produção.

São descritos os métodos empregados na caracterização físico-químico e biológico do agente causador da incrustação, são descritos também as ferramentas que irão combater este fenômeno bem como análise de dados antes e depois da implementação e a viabilidade do projeto.

I - Na empresa Amazonas Energia foi desenvolvida a pesquisa experimental sobre o tema proposto. Para isto, foram realizadas análises de caracterização da água e dos sedimentos e de suas propriedades, estudos dos processos de limpeza atual para eliminação das incrustações nos trocadores de calor.

Os ensaios e a pesquisa realizados foram:

II - Análise Físico-química e Biológica da água que alimenta os trocadores de calor;

II - Estudo de como é o procedimento atual para eliminação dos depósitos de material incrustante;

III - Tratamento dos dados de produtividade da usina e relação com a perda de eficiência dos trocadores de calor;

IV - Pesquisa de mercado para desenvolver possíveis empresas especialistas para implantar um processo de limpeza automático;

IV - Desenvolvimento e implantação do projeto;

V - Análise dos resultados de produtividade após a implementação da nova metodologia de limpeza dos trocadores de calor.

4.1.1 TIPOS DE LIMPEZAS UTILIZADAS

- Limpeza Mecânica

Um dos dois tipos de limpezas até então empregadas para minimizar a perda de eficiência dos trocadores de calor do Hidrogerador da máquina cinco, era a limpeza mecânica, consistia em o técnico de manutenção, após ter sido convocado pelo coordenador de manutenção via ordem de serviço que por sua vez havia sido acionado pela operação da planta de geração de energia, que por sua vez já havia detectado pelo sensor do tipo Termopar¹ que lê a informação e esta é tratada através do sistema de monitoramento que a temperatura do ar dentro da casa do gerador estava acima de 70°C, valor este acima dos limites operacionais determinados pelo fabricante do equipamento. Na Figura 4.1 fotos de termopares.



Figura 4.1: Termopares
Fonte: Promptbrasil

O técnico realizará a limpeza introduzindo uma haste de aço carbono de comprimento que varia entre 1400 mm a 1500 mm, comprimento do radiador, com

¹ Termopar é um dispositivo elétrico de larga aplicação em medição de temperaturas, composto por dois metais de diferente condutibilidade, quando exposto a uma fonte de calor geram um sinal elétrico.

uma ponta confeccionada em um material mais macio, PTFE², em cada um dos 87 tubos do trocador realizando movimentos de vai e vem, procurando assim arrastar os depósitos de dentro dos tubos. Na Figura 4.2 foto das varetas utilizadas para realização da atividade de limpeza dos trocadores de calor.

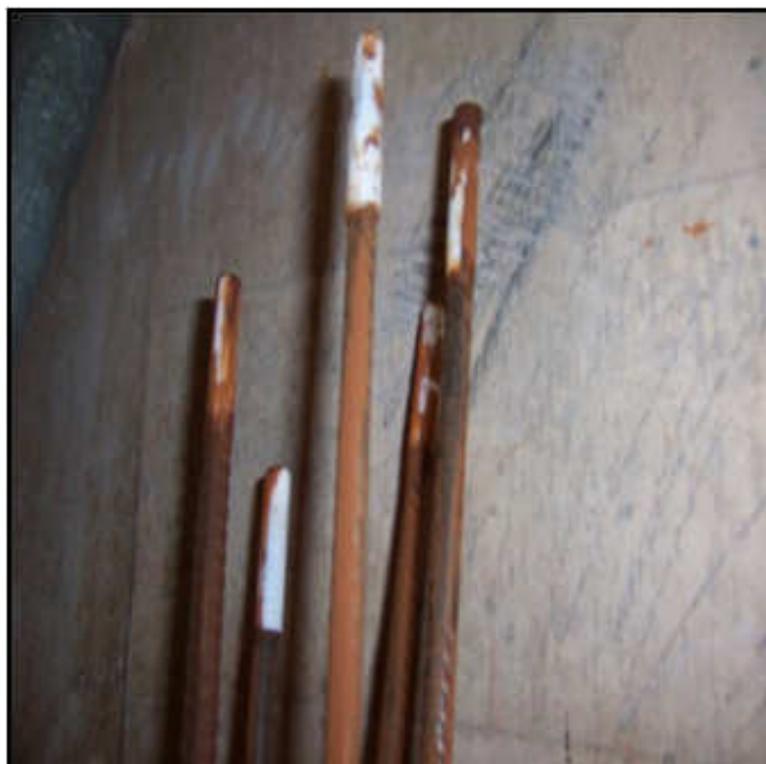


Figura 4.2: Foto de Varetas

Este procedimento é conhecido como varetamento. Os inconvenientes deste tipo de limpeza podem ser facilmente observados e descritos como:

Perdas de produtividade do Hidrogerador, pois há a necessidade de se pará-lo por não menos de quatro horas para realizar tal manutenção e segundo ARTEAGA (2010), uma hora de uma das 05 máquinas da hidrelétrica de Balbina parada, isto sem se levar em consideração os custos de mão de obra nem os de geração térmica de reposição custa R\$ 6.000,00.

Alto desgaste físico dos funcionários envolvidos no processo de limpeza, pois os movimentos de vai e vem para retirar os depósitos é cansativo devido à resistência natural dos depósitos, além da temperatura muito elevada dentro do casulo do Hidrogerador.

² Politetrafluoretileno é um polímero mais conhecido como teflon, que é uma marca registrada da empresa americana DuPont.

Na Figura 4.3 fotos do procedimento até então utilizado para remoção dos depósitos que causam a perda de eficiência do equipamento.



Figura 4.3: Procedimento de Varetamento Manual

- Limpeza Química

Além da limpeza mecânica, através do varetamento, também se adiciona hipoclorito de cálcio, 65% de cloro disponível, em bateladas diárias a fim de diminuir os períodos de paradas de máquinas para realização do procedimento de limpeza manual. A batelada de hipoclorito de cálcio é preparada em um piso superior aos trocadores de calor onde se utiliza 300 litros de água para diluir 3 kg do produto, após aproximadamente 40 minutos de mistura destes componentes esta solução é injetada por gravidade num ponto próximo ao filtro principal, filtro auto limpante, que serve todo o sistema de resfriamento da unidade geradora hidráulica.

A Figura 4.4 é uma foto do tanque de mistura de hipoclorito de cálcio para adição no sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina.



Figura 4.4: Tanque de Mistura de Hipoclorito de Cálcio

4.1.2 COMPONENTES DO SISTEMA

- Água de Resfriamento

As águas utilizadas em sistemas de resfriamento podem apresentar alguns problemas relacionados ao processo de troca térmica, que podem ser: corrosão; incrustações orgânicas e/ou inorgânicas.

Estes problemas podem ocorrer em conjunto apresentando variações em sua complexidade e intensidade, dependendo das características do fluido, como também o tratamento que nele, o fluido, é praticado e até mesmo nos matérias ou formas construtivas dos equipamentos utilizados no processo produtivo.

Existe a imensa necessidade de se controlar este problema para que se possa aumentar a produtividade e vida útil de equipamentos que compõe o sistema de resfriamento da planta.

A água utilizada no sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina é proveniente do seu próprio lago, este com 2360 Km² de área alagada, formado

pela barragem com altura de 51 m e uma extensão total de 2826 m de comprimento. A usina foi construída na década de 80, esta, com capacidade de 250 MW de geração energia elétrica, está localizada no rio Uatumã, município de Presidente Figueiredo - AM.

A Figura 4.5 é uma foto de satélite do lago formado pela barragem da Usina de Balbina.

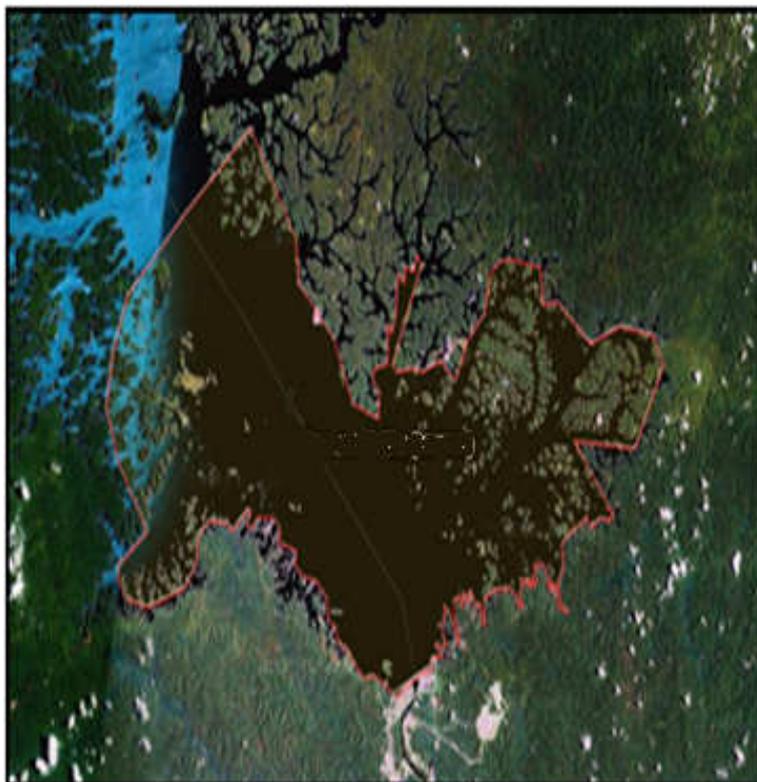


Figura 4.5: Foto de Satélite do Lago de Balbina
Fonte: Wikimapia

Como parte do estudo foi coletada amostras e realizada análise físico-química e biológica da água do lago da Usina Hidrelétrica de Balbina, em busca de sua caracterização e a partir de então podemos inferir algumas observações.

Na Figura 4.6 apresenta-se um relatório analítico da água coletada no lago de Balbina, onde se avalia vários fatores, dentre os quais, dureza cálcica, magnésica, quantidade de ferro.



MIRS-LAB

LABORATÓRIO DE ANÁLISES E PESQUISAS
CLÍNICAS, AR, ÁGUA, ALIMENTOS, MEDICAMENTOS, MATERIAL
MÉDICO-HOSPITALAR, EFLUENTES INDUSTRIAIS E DOMÉSTICOS
CONSULTORIA QUÍMICA, MICROBIOLÓGICA E AMBIENTAL



Reciclar é preservar
 a vida sustentável

RELATÓRIO ANALÍTICO ML 2100H0
 Proposta 602-10

INTERESSADO: FUCAPI – FUNDAÇÃO CENTRO DE ANÁLISE, PESQUISA E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA.
ENDEREÇO DA COLETA: Usina Hidrelétrica de Balbina.
IDENTIFICAÇÃO DO CONTROLE DO LABORATÓRIO: 01 amostra de água (Nº 01).
RESP. PELA COLETA: O Interessado **DATA DA COLETA:** 30.09.10
DATA DA ENTRADA NO LABORATÓRIO: 01.10.10
DATA DE EMISSÃO DO RELATÓRIO: 15.10.10
DESCRIÇÃO DA (S) AMOSTRA (S): 01 – Bio Usimã (Usina Hidrelétrica de Balbina).

RESULTADOS

- **BACTERIOLÓGICOS:**

PARÂMETROS	UNIDADE	AMOSTRA
Bactérias Heterotróficas	u.f./ml	54
Coliformes Totais	NMP/100 ml	Ausentes
Coliformes Fecais (<i>Escherichia coli</i>)	NMP/100 ml	Ausentes

* Número Mais Provável em 100 mililitros.
 ** u.f.c. = Unidade formadora de colônia por mililitro.

- **FÍSICO-QUÍMICOS:**

PARÂMETROS	UNIDADE	AMOSTRA
Dureza Cálcica	mg CaCO ₃ /L	4,0
Dureza Magnésica	mg CaCO ₃ /L	6,0
Ferro Total	mg Fe/L	1,67
Nitrato	mg NO ₃ /L	0,40
Oxigênio Dissolvido	mg O ₂ /L	2,2
pH	-	5,29
Sulfato	mg SO ₄ /L	1,0

MÉTODO DE REFERÊNCIA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF, 21ª Edição.
LICENÇA DE OPERAÇÃO - L.O. N° 28508-10 (IPAAM).
OBS: O pH levemente ácido é característica das águas superficiais e subterâneas da região.



FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DO AMAZONAS



INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DO AMAZONAS

RUA 10 DE JULHO, 908 – CENTRO / Fone: (02) 3234-0666 / 3623-7220 – Fax: (02) 3234-7504 – CEP 69010-060 – Manaus-AM
Site: www.laboratoriomicrolab.com.br - e-mail: ambientais@laboratoriomicrolab.com.br

Figura 4.6: Análise Físico-Química e Biológica da Água.

- Radiadores

Os trocadores de calor estudados neste trabalho são do tipo radiador, ar/água. Este tipo de equipamento funciona a partir do seguinte princípio, por dentro dos tubos passa a água, que é o fluido refrigerante e por fora dos tubos em um sentido perpendicular caracterizando um trocador de calor de correntes cruzadas, passa o ar.

Possui um feixe tubular de 87 tubos divididos em quatro passes, ou seja, a água entra pela parte inferior em temperatura ambiente e passa quatro vezes dentro do trocador, o fluido a ser refrigerado é o ar que anteriormente a passagem pelo trocador, realizou o processo de troca de calor com o rotor do Hidrogerador.

Devido esta troca de energia o ar necessita ser resfriado para retornar e realizar o processo de troca térmica com o gerador de energia, graças à geometria do rotor o ar é impulsionado e forçando a passar por entre os tubos do radiador, mantendo assim sua temperatura dentro dos parâmetros operacionais considerados normais. Na figura 4.7 e representado a passagem do fluido frio, água, por dentro do trocador de calor.

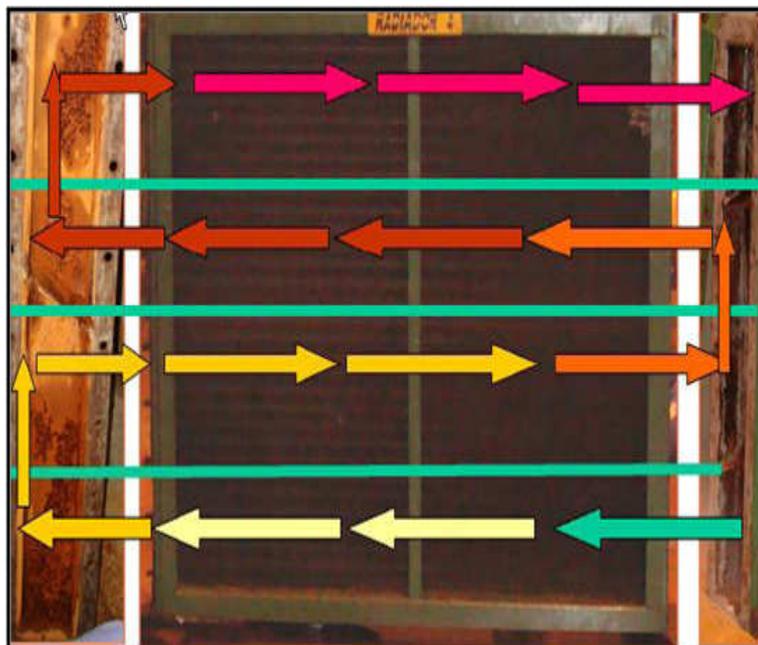


Figura 4.7: Passagem de Água pelo Radiador

Em cada máquina existem oito trocadores deste tipo que estão dispostos em círculo em volta do Hidrogerador, compondo assim o sistema responsável pelo resfriamento do Hidrogerador das UGH's da usina hidrelétrica de Balbina, conhecido como sistema de resfriamento do Hidrogerador.

Cada trocador é composto 87 tubos aletados, onde, a água passa por dentro destes e o ar por fora, 14 mm de diâmetro, proporcionando uma vazão de 46 a 52 m³/h, o material dos tubos é uma liga de cobre, sua altura é de 1194 mm, largura de 250 mm e comprimento de 1660 mm, suas tampas são em ferro fundido. Capacidade de troca térmica de 159,15 kJ.

Na Tabela 4.1 os dados de cada trocador de calor que compõem o sistema de resfriamento da UGH 05 da UHE Balbina.

Tabela 4.1: Características do Processo e dos Radiadores

Condições de Operação	Casco	Tubo
Fluido em Circulação	Ar	Água
Temperatura de Entrada °C	71,3	30
Temperatura de Saída °C	40	33
Vazão m³/h	16992	46
Pressão de Trabalho Kgf/cm²	–	4 Máx.
Numero de Passes	1	4
Peso vazio Kg	620	
Peso Cheio Kg	660	

Na Figura 4.8 uma foto de um dos trocadores de calor tipo radiador ar/ água do sistema de resfriamento da Unidade Geradora Hidráulica 05 da Usina hidrelétrica de Balbina. Notam-se as aletas nas superfícies dos tubos, por onde o ar é forçado a passar e com isso trocar calor com a água que passa por dentro dos tubos.

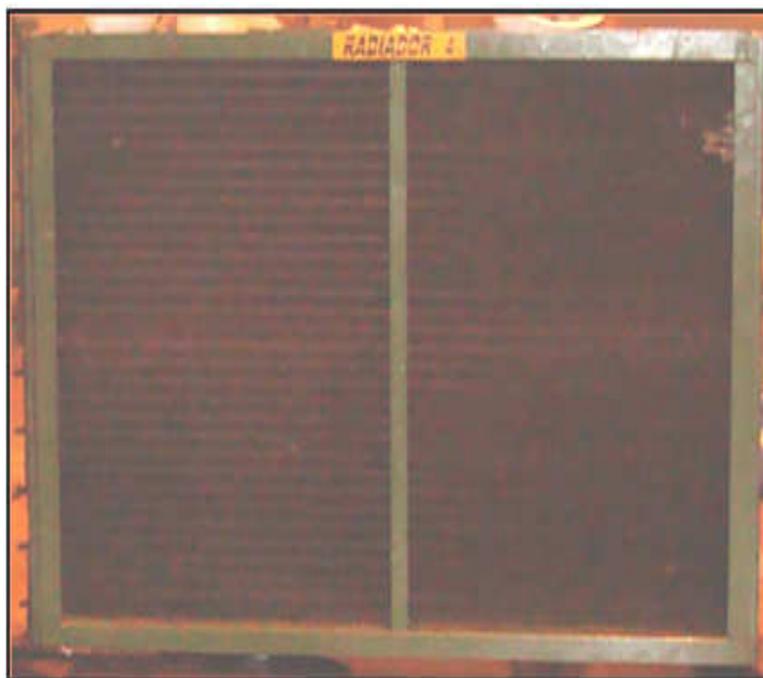


Figura 4.8: Radiador 04 da UGH 05.

- Válvula de Reversão Automática

Para promover o movimento dos elementos limpadores no interior dos tubos, havia a necessidade de se inverter por algum período o fluxo de água no interior dos trocadores de calor, a alternativa possível seria a montagem de um elemento de controle de controle automático do fluxo.

O elemento de controle utilizado para realizar o processo de reversão automática do fluxo da água dentro dos trocadores de calor foi uma válvula, isso para que as escovas de nylon pudessem ser impulsionadas e percorressem de um lado para o outro da tubulação do trocador de calor.

A válvula é pneumática de quatro vias e duas posições construída em aço carbono com quatro flanges de 14 polegadas revestidos internamente em tinta a base de epóxi, para evitar corrosão ou erosão causada pelo movimento do fluxo de água, suas dimensões são 1000 mm x 700 mm x 800 mm, peso aproximadamente de uma tonelada, bocais de entrada e saída de 14 polegadas, o seu atuador é do tipo pneumático. .

Na figura 4.9, um desenho da modificação realizada nas tubulações de entrada e saída de água para os trocadores de calor, a fim de instalar a válvula de reversão de fluxo. Em azul instalação existente e em vermelho a modificação.

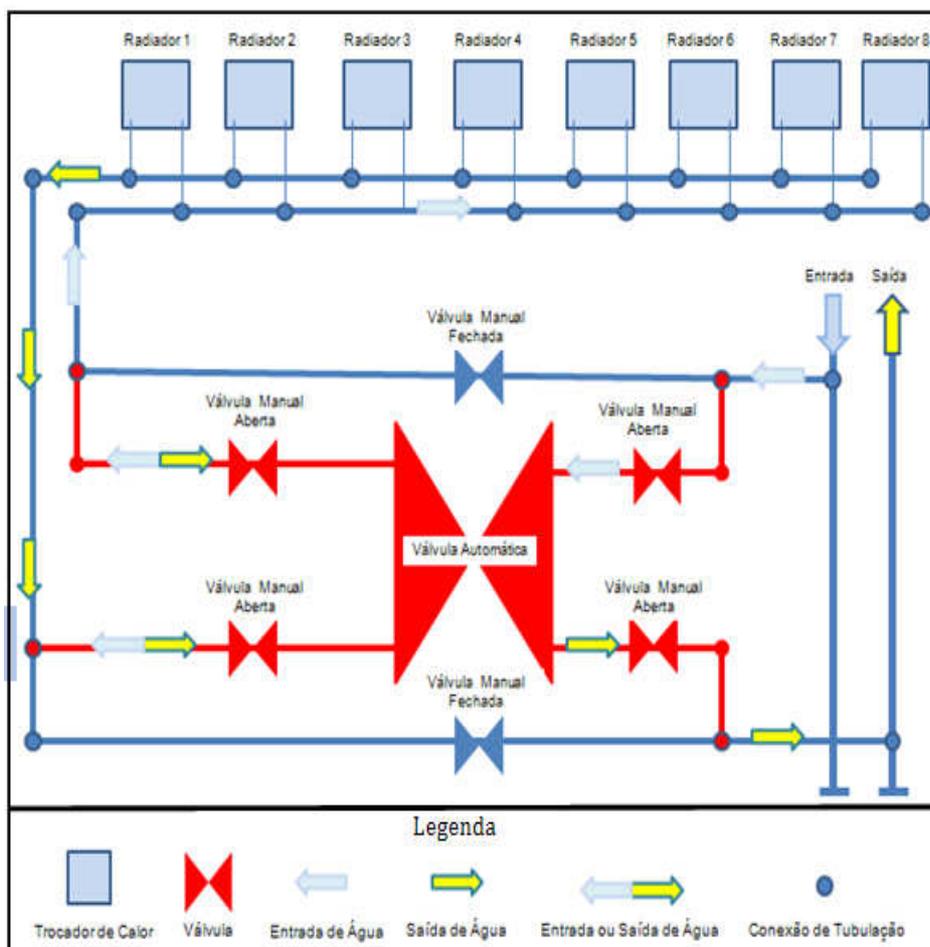


Figura 4.9: Desenho da Modificação na Tubulação

Na figura 4.10 uma foto da já válvula montada sobre uma base construída em aço carbono apoiada em quatro colunas também construídas em aço carbono fixadas ao solo com quatro parafusos de 5/8 de polegadas em cada uma das quatro colunas e interligada a tubulação principal, o barrilete principal da usina, o de 18 polegadas.



Figura 4.10: Foto da Válvula de Reversão

- Painel de Comando da Válvula

A válvula automática abre e fecha automaticamente sem a necessidade da intervenção nem do operador nem do mantenedor, para isto é necessário um sistema de comando autônomo. Este comando é possível através de um painel eletro-eletrônico composto de um sistema simples que envolvem um conjunto de relés temporizados, disjuntores e um timer responsável pelo tempo em que a válvula mudará de posição e permanecerá também nesta posição, em principio ficou configurado um tempo de quatro horas entre uma reversão e outra e 180 segundos de fluxo em sentido invertido.

O tempo foi estipulado levando em consideração alguns fatores, mas o que mais foi relevante foi que o processo da formação de incrustação, responsável pelo entupimento, é um processo que podemos definir que age de uma forma relativamente lenta, progressiva e gradual, ou seja, acontece camada por camada até o comprometimento da eficácia do trocador de calor e até mesmo da sua disfunção por completa.

Na figura 4.11 uma foto frontal do painel de controle do sistema de limpeza automático dos trocadores de calor da máquina 05 da UHE Balbina.

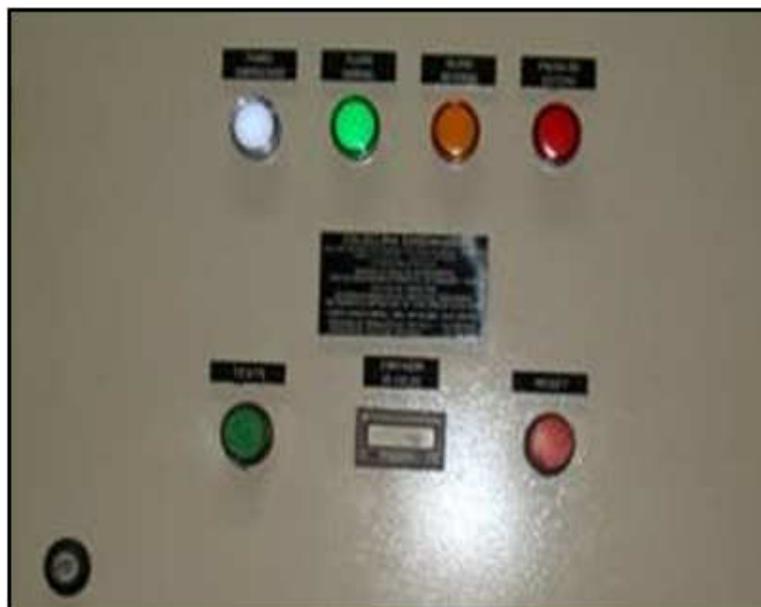


Figura 4.11: Painel de Comando da Válvula Automática

- Tubos de PRFV

As tubulações de água da usina hidrelétrica de Balbina são todas construídas em um material não metálico a fim de evitar corrosão, PRFV³.

Houve a necessidade de segmentar uma parte da tubulação principal de alimentação de água de resfriamento para poder inserir a válvula de reversão automática do fluxo de água.

O material da tubulação é PVC⁴ revestido com fibra de vidro, este material não é metálico e com isto foi utilizado um procedimento de união a frio adicionando varetas de PVC, nas uniões a fim de proporcionar vedação necessária à pressão de mais ou menos 2,5 Kgf/Cm² que esta tubulação está submetida.

³ Resina de poliestireno reforçada com fibra de vidro

⁴ Plástico com 57% de cloro e 43% eteno, cloreto de polivinila.

Na Figura 4.12 uma foto das tubulações onde foi inserido o novo arranjo de a fim de instalar a válvula.



Figura 4.12: Detalhe do Corte e Solda na Tubulação

- Escovas

Além da válvula para inverter o fluxo de água dentro dos trocadores havia a necessidade também de um agente mecânico para arrastar as incrustações de dentro dos tubos do trocador, para isto foram desenvolvidas escovas com um formato helicoidal, fabricadas em nylon com elemento de fixação em aço inoxidável 316, poderia ser de outro material, mas como o nylon tem uma resistência mecânica menor que o cobre este foi escolhido para evitar desgaste excessivo nas paredes internas dos tubos do trocador, pois estas escovas foram montadas com interferência de aproximadamente 0,5 mm no intuito de maximizar o arrasto.

Os materiais de construção das escovas foram aplicados para que além da propriedade de flexibilidade, estas deveriam ser também resistentes à corrosão, tanto suas cerdas quanto o elemento de fixação delas, caso contrário poderiam sofrer um processo de corrosão inutilizando-as em pouco tempo.

Na Figura 4.13 foto de uma escova utilizada no sistema de limpeza.

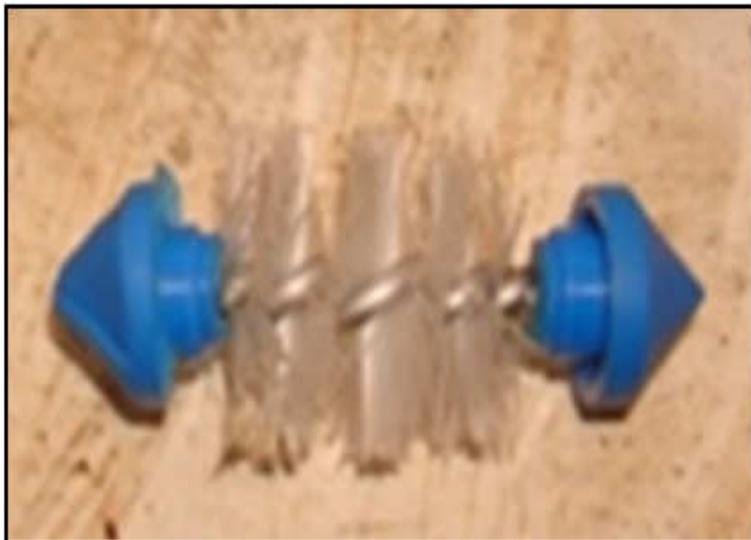


Figura 4.13: Elemento de Limpeza

- Retentores

Os retentores também são componentes deste sistema e tem igual importância funcional aos outros componentes anteriormente citados, sua finalidade é de segurar as escovas em seu interior evitando assim que as mesmas obstruam a passagem da água. Construídos em polipropileno apresentam resistência mecânica adequada ao processo e também não estão suscetíveis ao fenômeno da corrosão. Na Figura 4.14 uma foto de um retentor antes da montagem no sistema.

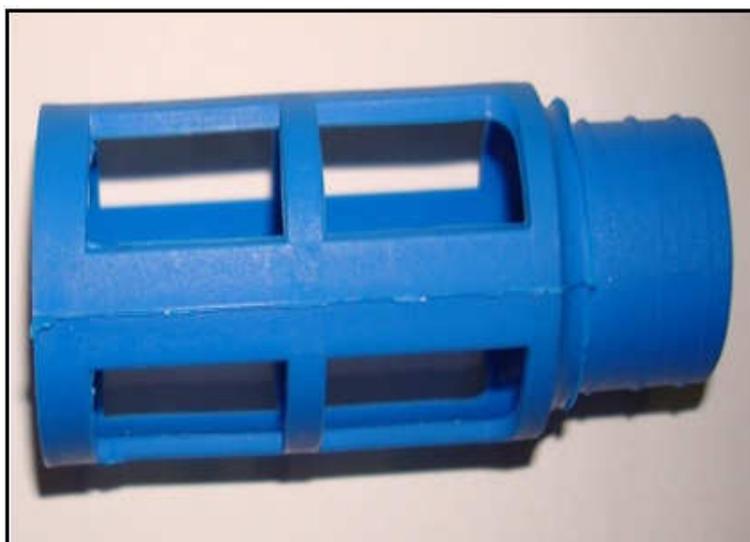


Figura 4.14: Retentor

CAPITULO V- RESULTADOS E DISCURÇÕES

5.1 ANÁLISES DOS RESULTADOS

5.1.1 ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Foram realizadas análises físicas - químicas e bacteriológicas da água de resfriamento do sistema de trocadores de calor da Usina de Balbina, as amostras foram captadas na saída da rede de trocadores de calor do Hidrogerador da UGH 05, estas análises foram realizadas em Laboratório de Análises e Pesquisas.

Os parâmetros aos quais foi dada maior atenção e estudados foi à possibilidade de uma dureza da água acima do normal, pois sabemos que uma dureza da água muito elevada pode acarretar problemas de incrustações por precipitações de sais, dureza cálcica CaCO_3 e dureza magnésica, também foram analisadas a quantidade de oxigênio dissolvido O_2 , sabe-se que este fator nos possibilita deduzir quando da existência de bactérias e se estas são aeróbicas ou anaeróbicas, foi estudado também a concentração de ferro, Fe, sulfatos e análise microbiológica.

Para o parâmetro avaliado dureza cálcica foi encontrado um valor de 4,0 mg CaCO_3/L , podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual podemos considerar mole.

Para o parâmetro avaliado, dureza magnésica, foi encontrado um valor de 6,0 mg CaCO_3/L , podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual podemos considerar mole.

Para o parâmetro avaliado, ferro total, foi encontrado um valor de 1,67 mg Fe/L , podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o

sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual podemos considerar com alto teor de ferro.

Para o parâmetro avaliado, Nitrato, foi encontrado um valor de 0,4 mg NO_3/L , podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual podemos considerar com baixa concentração de nitrato.

Para o parâmetro avaliado, oxigênio, dissolvido foi encontrado um valor de 2,2 mg O_2/L , podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual podemos considerar com boa oxigenação.

Para o parâmetro avaliado, sulfato, foi encontrado um valor de 1,0 mg SO_4/L , podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual podemos considerar passível de formação de incrustação.

Para o parâmetro avaliado, pH, foi encontrado um valor de 5,29, podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual podemos considerar ácida.

Para o parâmetro avaliado, bactérias heterotróficas, foi encontrado um valor de 64 u.f.c/mL, podemos deduzir observando o valor encontrado, que a água que abastece o sistema de resfriamento da Usina Hidrelétrica de Balbina apresenta uma característica de uma água a qual pode formar colônias de bactérias.

Para os parâmetros avaliados, coliformes fecais (*Escherichia coli*) e coliformes totais, não foram observados presença na amostra.

Após toda esta análise podemos resumir que a água que alimenta o sistema de resfriamento de Balbina, é uma água ácida com uma dureza relativamente baixa, com níveis de ferro propícios a ferro-bactérias, com níveis de oxigênio que pode propiciar o aparecimento de bactérias aeróbicas e uma grande possibilidade de conter bactérias heterotróficas.

Com base no relatório analítico ML 2010/10 podemos apontar que a formação de incrustação e entupimento dos trocadores de calor que constituem o sistema de resfriamento do Hidrogerador da máquina cinco da Usina Hidrelétrica de Balbina está ligada principalmente as características da água que alimenta os mesmos.

5.1.2 PARÂMETROS DO PROCESSO

Foram observados alguns parâmetros do processo de troca de calor do sistema de resfriamento do gerador da UGH 05, a temperatura de entrada foi medida com um termômetro digital.

Foi encontrado um valor de 30°C enquanto a temperatura de saída (tfs) foi calculada observando-se um ganho de temperatura menor que 1°C entre a saída e a entrada do trocador, conforme Figura 5.1.



Figura 5.1: Medidor de Temperatura

A pressão de entrada de água é de $3,5 \text{ kgf/cm}^2$, conforme medido no manômetro instalado na entrada dos trocadores, foi medida a velocidade através de um medidor de fluxo ultrassônico, verificou-se um valor de $2,4 \text{ m/s}$, conforme as Figuras 5.2 e 5.3.



Figura 5.2: Sensores do Medidor Ultra Sônico



Figura 5.3: IHM do Medidor Ultra Sônico

Com apenas estes dados isolados não é possível definir como e porque ocorre o aparecimento desta incrustação na parede interna dos tubos dos trocadores de calor da UGH 05 da UHE-Balbina, contudo comparando estes resultados com os dados da análise de água podem-se deduzir algumas possíveis soluções para esta interrogação.

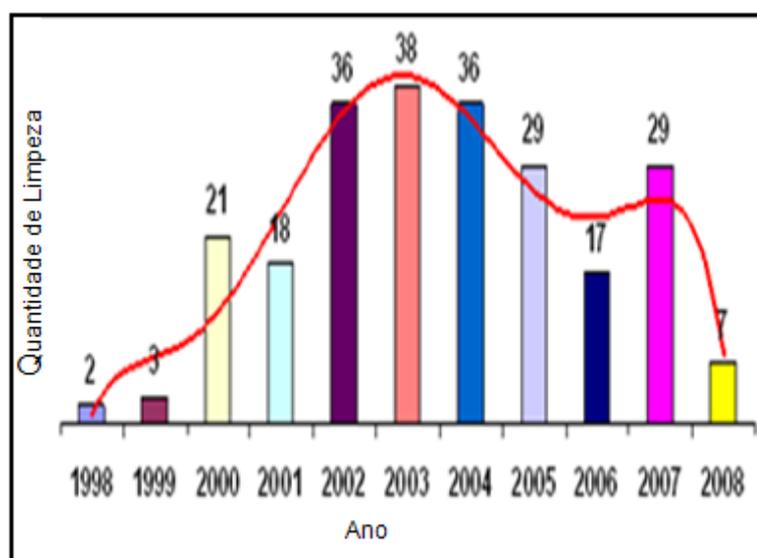
5.1.3 DADOS DE PRODUTIVIDADE ANTES DO SISTEMA INSTALADO

O primeiro passo foi levantar um histórico de paradas das máquinas para realização do procedimento de varetamento manual dos trocadores de calor ar/água dos sistemas de resfriamento das UGH's da Usina de Balbina. Como poderia ser um fenômeno sazonal, e para uma melhor avaliação de medidas a serem tomadas foi necessário trabalhar com um período dos 10 anos anteriores a instalação do sistema. Ver Quadro 5.1 e Gráfico 5.1.

Quadro 5.1: Histórico de Limpeza dos Radiadores da UHE-Balbina

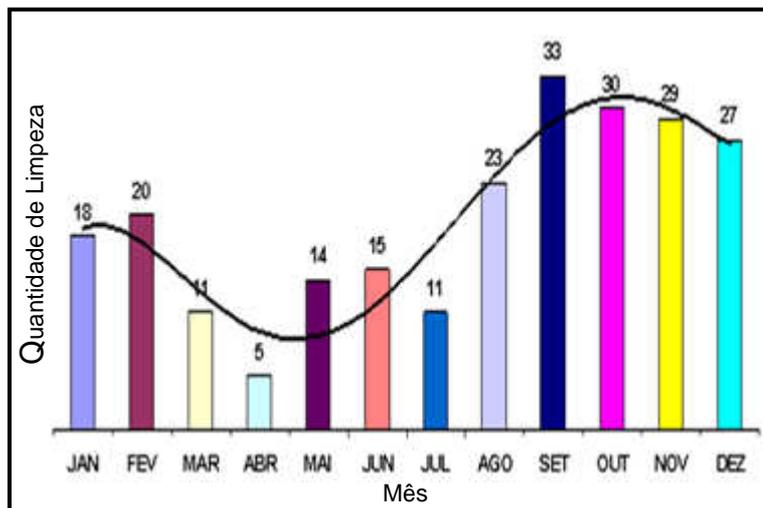
HISTÓRICO DE LIMPEZA DOS RADIADORES DA UHE-BALBINA												
ANOS	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	TOTAL
JAN	0	3	3	5	3	1	2	0	1	0	0	18
FEB	1	5	0	3	4	1	5	1	0	0	0	20
MAR	0	1	0	3	2	3	1	0	1	0	0	11
ABR	0	0	0	1	1	2	0	1	0	0	0	5
MAY	0	1	1	2	0	4	4	2	0	0	0	14
JUN	0	4	0	1	2	0	5	1	2	0	0	16
JUL	1	1	1	2	2	1	2	0	0	1	0	11
AGO	1	1	1	2	4	6	5	0	0	2	1	23
SET	2	3	4	1	4	6	2	1	0	0	0	23
OUT	1	5	4	3	5	4	2	3	3	0	0	30
NOV	0	3	2	3	4	6	4	4	3	0	0	29
DEZ	1	2	1	3	5	4	4	5	1	0	1	27
TOTAL	7	29	17	29	36	38	36	18	21	3	2	265

Gráfico 5.1: Histórico de Limpeza de 1998 a 2008



Conforme o Gráfico 5.2 observa-se uma nítida tendência de entupimento dos trocadores de calor de uma forma mais acentuada nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, com isto verificou-se realmente uma sazonalidade do problema.

Gráfico 5.2: Quantidade de Limpezas por Mês

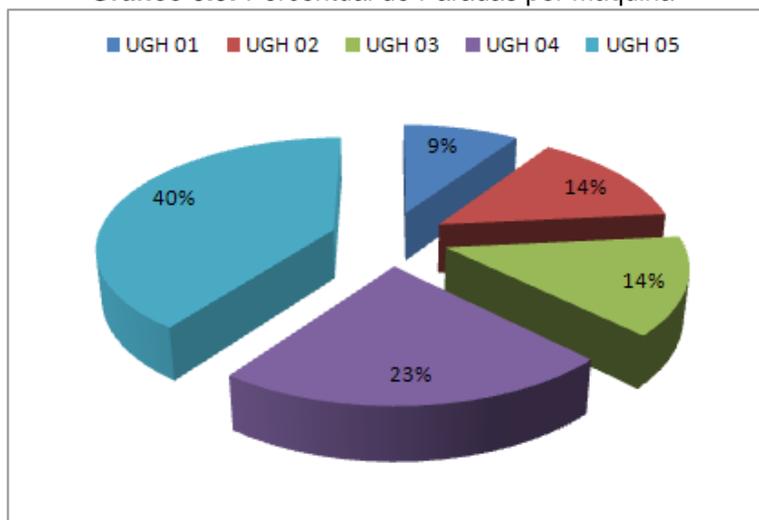


Após este levantamento estratificou-se ainda mais este dados, levando em consideração agora máquina por máquina, ou seja, levantar dados de quantas vezes cada máquina parou para realização de limpeza manual, e com isto definir em qual das máquinas implantar o projeto piloto.

Observa-se agora no Quadro 5.2 e no Gráfico 5.3, o levantamento realizado individualmente, máquina a máquina, comparando o desempenho de cada grupo gerador.

Quadro 5.2: Limpeza Ano X Máquina

LIMPEZA X ANO						
ANO	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3	GRUPO 4	GRUPO 5	TOTAL
1998	1	1	0	0	0	2
1999	1	0	2	0	0	3
2000	3	4	4	4	6	21
2001	5	0	3	0	10	18
2002	0	5	7	8	16	36
2003	2	6	12	9	9	38
2004	4	2	11	4	15	36
2005	3	3	5	3	15	29
2006	1	3	4	0	9	17
2007	2	7	5	5	10	29
2008	0	2	1	0	4	7
TOTAL	21	32	54	33	94	236

Gráfico 5.3: Percentual de Paradas por Máquina

Após a análise dos dados coletados, pode-se notar qual foi a motivação pela instalação do projeto piloto do sistema de limpeza automático dos radiadores na máquina cinco ao invés de outra máquina, pois este equipamento foi o que mais parou no período estudado, que correspondeu de 1998 a 2008, estas paradas para manutenções no seu sistema de resfriamento do Hidrogerador, procedimento de limpezas manuais, totalizaram 94 intervenções causando mais perdas de produtividade para Usina Hidrelétrica de Balbina de que qualquer uma das outras máquinas instaladas em sua planta de geração hidráulica.

Este dado ainda é mais interessante e importante devido esta máquina ser uma máquina de número ímpar significando especificamente no projeto de Balbina uma máquina que tem prioridade de operação, pois máquinas ímpares nesta instalação significa que ela alimenta todos os sistemas auxiliares, tipo bombas d'água, compressores, iluminação, motores em geral dentre outros equipamentos indispensáveis ao funcionamento da Usina hidrelétrica.

5.1.4 RESULTADOS OPERACIONAIS APÓS A INSTALAÇÃO DO SISTEMA

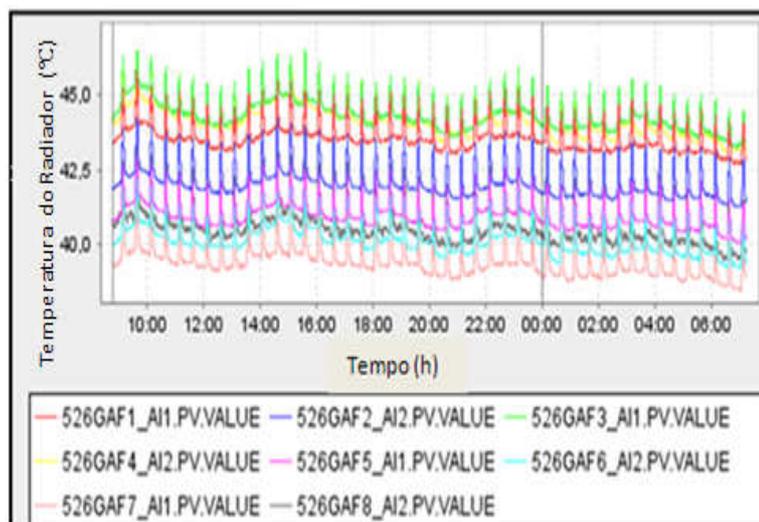
- Temperatura de cada Radiador

O sistema de limpeza automático foi instalado na máquina 05, foi monitorado seu desempenho através do perfil de temperatura de cada radiador.

A variável medida neste caso é a temperatura de saída de ar de cada radiador individualmente, o termopar é instalado a frete do equipamento e este mede a temperatura que está saindo sem a interferência do outro ao lado. Ver Gráfico 5.4.

A intenção deste tipo de medição é monitorar o desempenho individual de cada componente do sistema.

Gráfico 5.4: Perfis de Temperatura por Radiador



Para um melhor entendimento do Gráfico 5.4 é importante entender a codificação apresentada. Os radiadores são numerados de 01 a 08 e cada um é representado por uma seqüência de caracteres, tomemos como exemplo o radiador 01, os primeiros caracteres '526' são comuns para todos os trocadores de calor, indicam que estamos monitorando a unidade geradora de número cinco com o transmissor de temperatura 26, por sua vez letra 'G' significa gerador e as letras 'AF' significam ar frio, e o número 1 indica qual dos oitos esta sendo observado.

Isto significa que o perfil que está sendo monitorando, neste caso, é o perfil de temperatura do radiador 01 da máquina cinco, os demais seguem a mesma seqüência.

Analisando estes perfis de temperatura, durante as vinte primeiras horas após a implementação do sistema, observa-se que existem diferenças de temperatura entre os radiadores variando em torno de 5°C apesar de estarem ligados à mesma rede de alimentação de água, nota-se também um pulso de aproximadamente 1,5°C a cada 30 minutos.

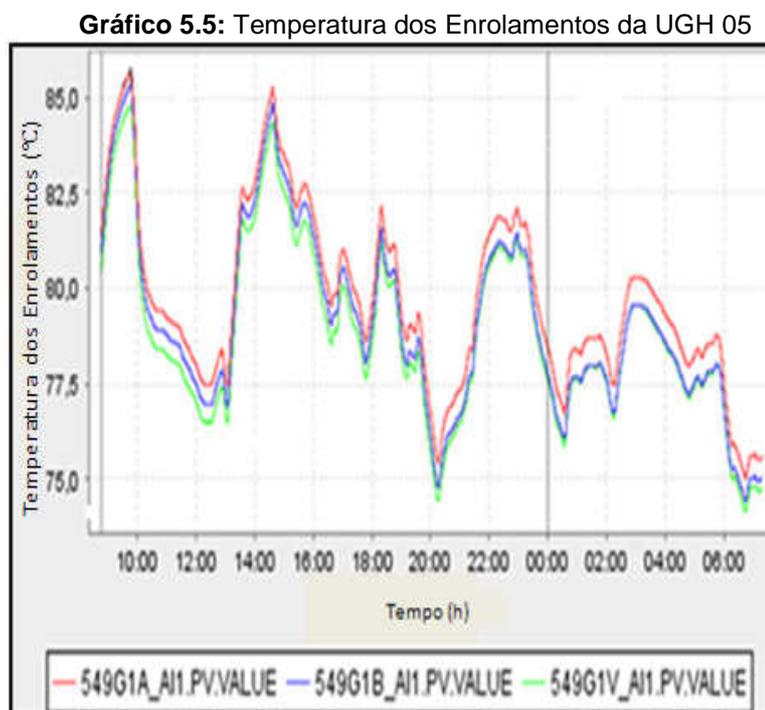
Quanto à diferença de temperatura entre os radiadores, pode ser considerado previsto, levando em consideração que os mesmos são montados em uma rede tipo 'U', podendo assim uns estar recebendo um pouco de água a mais do que os outros.

Quanto aos picos de temperatura observados a cada 30 minutos são considerados perfeitamente normais, pois é exatamente no momento em que a válvula se encontra em transição entre as posições de aberto para um lado e fechada para o outro, com isto ocorre uma situação momentânea de vazão zero e então não há troca de calor e então a temperatura se eleva rapidamente, como é uma situação momentânea tão logo a válvula começa a abrir novamente as temperaturas voltam aos seus patamares anteriores.

- Temperatura dos enrolamentos

Este monitoramento é realizado paralelamente ao monitoramento dos radiadores, neste caso podemos considerar a temperatura dos enrolamentos, como a fonte de calor, devido esta se comportar aumentando sua temperatura conforme a carga demandada de energia a ser gerada, os sensores de temperatura estão instalados de forma a perceberem qualquer variação de temperatura sem a interferência de outras variáveis de processo.

Estas variáveis também foram observadas e coletadas num período de 20 horas após a instalação do sistema, onde nota-se que há um decréscimo de temperatura em todas as fases ao longo do período avaliado. Conforme Gráfico 5.5.



Para um melhor entendimento do Gráfico 5.5, são três as fases do enrolamento são denominadas A, B e V, cada fase é representada pela sua própria letra. Tomemos como exemplo a fase A, os primeiros caracteres '549' são comuns para todas as fases, indicam que estamos monitorando a unidade geradora de número cinco com o transmissor de temperatura 49, por sua vez letra 'G' significa gerador e os caracteres '1A' significam fase A.

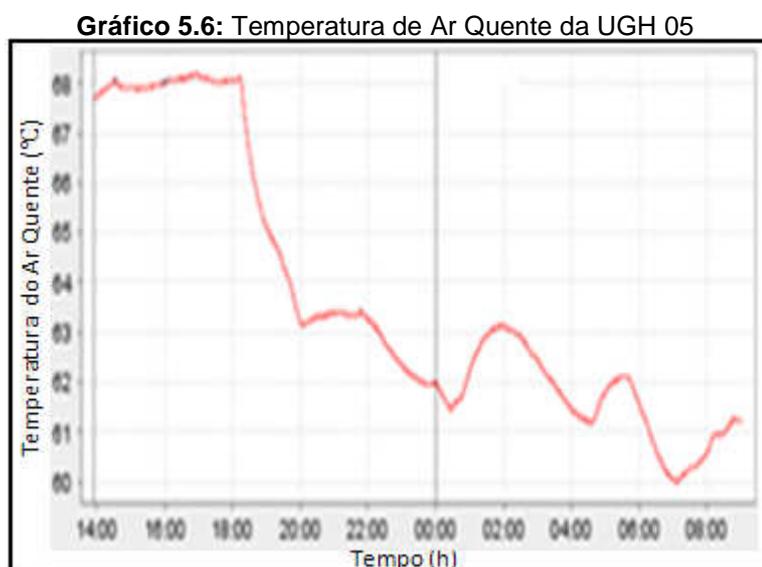
Neste gráfico 5.5 observa-se que as temperaturas de cada fase variam de uma forma proporcional e proporcional também a carga de geração solicitada pelo consumidor.

- Temperatura do ar quente

Esta variável é uma das mais importantes neste processo, pois nela está atribuído um valor de *trip* da máquina, ou seja, a máquina vai desligar quando alcançar certa temperatura que foi anteriormente programada isto levando em consideração os fatores construtivos e de materiais do projeto da máquina estudada.

As temperaturas de ar quente de todas as unidades geradoras de Balbina estão ajustadas para o desligamento em 75°C, mas antes em uma temperatura preliminar de 70 graus Celsius é acionado um alarme que teoricamente serviria para uma programação de parada da máquina para realização do procedimento de limpeza interna dos tubos dos radiadores.

No Gráfico 5.6 observa-se o perfil de temperatura do ar quente variando em função do tempo de operação do gerador.



Percebe-se uma tendência de queda de temperatura no decorrer do período analisado, variando de aproximadamente 67,6°C às 14:00 h, a 62,5°C às 09:00 h, isto pode acontecer principalmente por dois motivos, um pode ser a demanda do consumo de energia elétrica na cidade de Manaus diminuindo no decorrer do período avaliado, outro seria os movimentos propiciados pela inversão do fluxo de

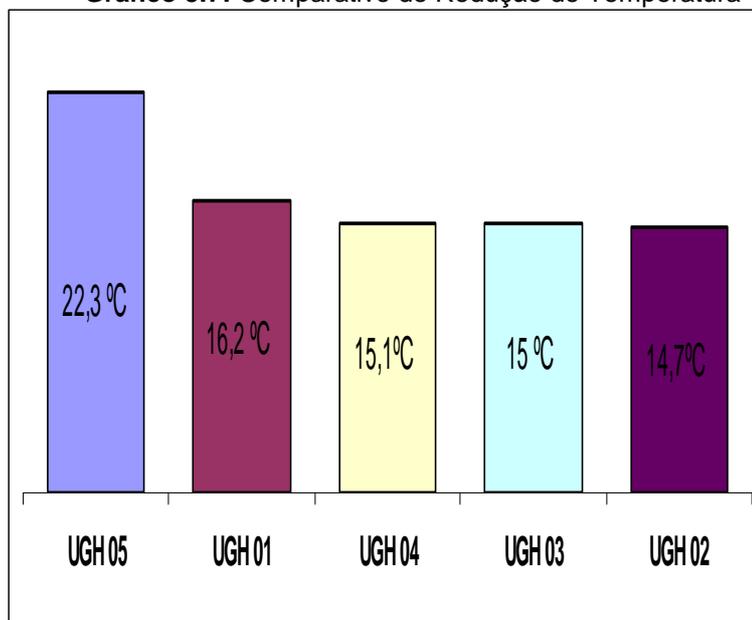
água dentro dos trocadores de calor, isto fornece energia as escovas e estas se deslocam num movimento de vai e vem das no interior dos tubos eliminando ainda mais o material que poderia está impregnado nas paredes dos tubos.

Em comparação com outras Unidades Geradoras a máquina 05 apresentou uma maior eficiência em termos de transferência de calor do que as outras quatro máquinas que não possuem o sistema instalado. Conforme Tabela 5.1 e Gráfico 5.7.

Tabela 5.1: Comparativo de Redução de Temperatura

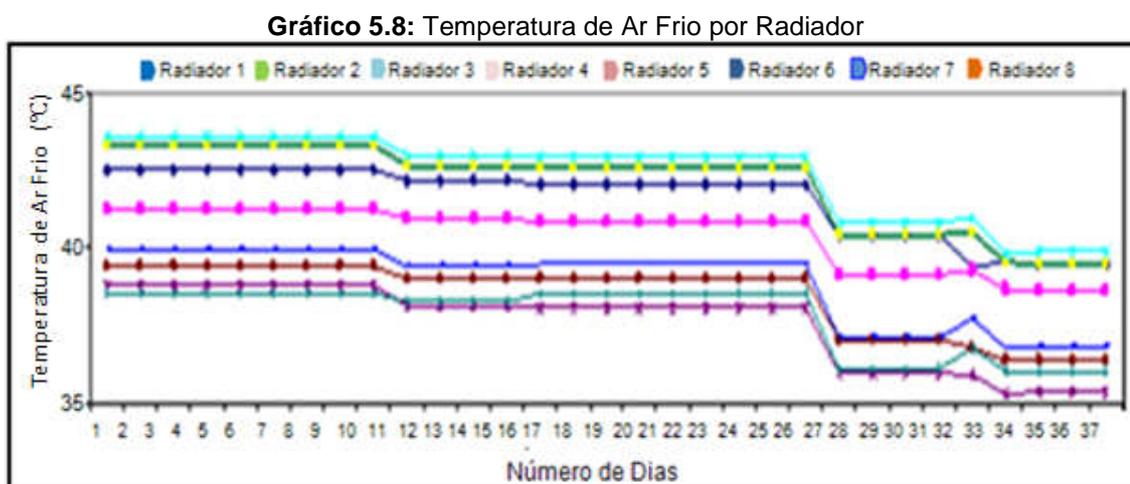
MAQUINA	AR QUENTE (°C)	AR FRIO (°C)	REDUÇÃO (°C)
UGH 01	53,5	37,3	16,2
UGH 02	57,7	43,0	14,7
UGH 03	59,0	44,0	15,0
UGH 04	60,2	45,2	15,1
UGH 05	60,7	38,3	22,3

Gráfico 5.7: Comparativo de Redução de Temperatura



- Quantidade de Intervenções para Ajustes Pós Instalação do Sistema

Depois da instalação do sistema foram feitas observações constantes e diárias para verificar a eficácia do novo sistema através do desempenho da capacidade de troca de calor dos radiadores, para isto foi monitorado a temperatura do ar frio, e apresentaram-se os seguintes resultados. O Gráfico 5.8 relaciona a temperatura de cada trocador de calor em função dos dias de operação.



O Gráfico 5.8 mostra o desempenho de cada radiador ao longo dos trinta e sete primeiros dias pós-instalação do sistema automático de limpeza dos tubos dos trocadores de calor, pode-se notar uma tendência do aumento da eficiência da troca térmica de cada trocador de calor e conseqüentemente uma queda da temperatura de operação da UGH 05.

Verifica-se também uma diferença de temperatura entre os trocadores de calor, que também diminuem proporcionalmente ao longo do período estudado, reforçando assim a idéia de que estas diferenças entre os trocadores estejam relacionadas ao posicionamento físico dos mesmos dentro da UGH 05 e não de uma diferença de desempenho entre os radiadores.

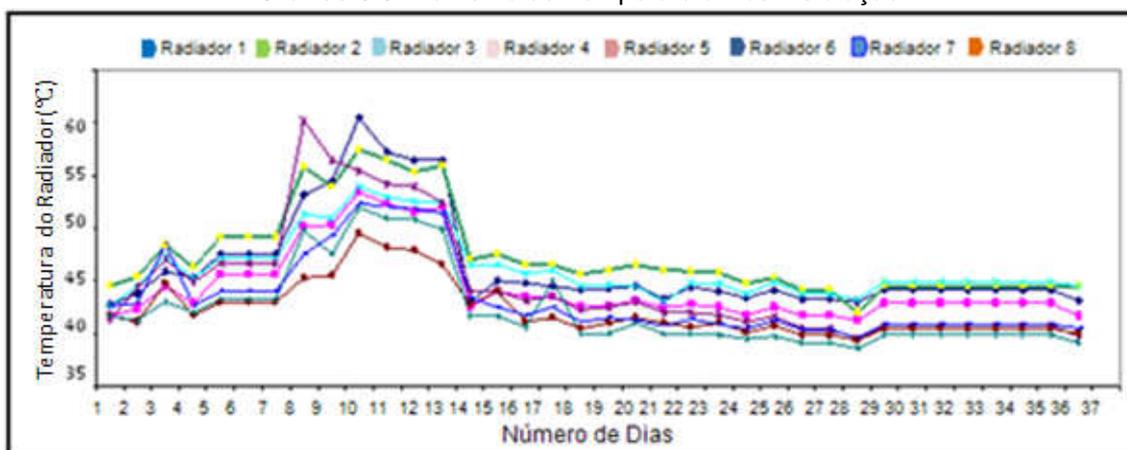
Apesar de verificarmos uma maior eficiência dos trocadores de calor, neste período foram necessárias algumas intervenções de caráter a ajustar o sistema, estas intervenções foram necessárias para averiguar diferenças fora da

normalidade em determinado espaço de tempo, na qual podemos destacar as seguintes:

Após um determinado período de avaliação dos dados pós-instalação do sistema automatizado observou-se um aumento de temperatura fora do comum, houve a necessidade de averiguar o que estava acontecendo internamente nos trocadores de calor então, planejou-se uma parada do equipamento para que pudesse ser aberto um trocador e realizado a análise do que estava ocorrendo. .

Conforme Gráfico 5.9 o aumento de temperatura iniciou no sétimo dia depois da instalação diminuindo apenas a parti do décimo quarto dia, isso depois da melhoria realizada nas vedações internas das tampas dos trocadores de calor.

Gráfico 5.9: Aumento de Temperatura Pós Instalação



Com a parada da máquina e abertura das tampas traseiras dos radiadores observou-se que as divisões internas destas tampas estariam dando passagem entre os passes dos trocadores, causando assim uma espécie de refluxo interno prejudicando o perfeito deslocamento do fluxo de água dentro do equipamento.

A água de resfriamento deve entrar pela parte inferior do trocador de calor, percorrer toda a extensão dos tubos deste passe, através da tampa traseira ser redirecionada para o próximo passe este, opera no sentido inverso ao primeiro, percorre toda a extensão do segundo passe quando chega à tampa frontal esta direciona o fluxo de água para o terceiro passe que retorna no

mesmo sentido do primeiro, e por fim este fluxo é redirecionado pela tampa trazeira ao quarto e ultimo passe antes do fluido resfriador ser descartado para a rede de saída do sistema de resfriamento do hidrogerador que o levará a jusante da usina sem retorno para esta função de troca de calor. Conforme Figura 5.4.

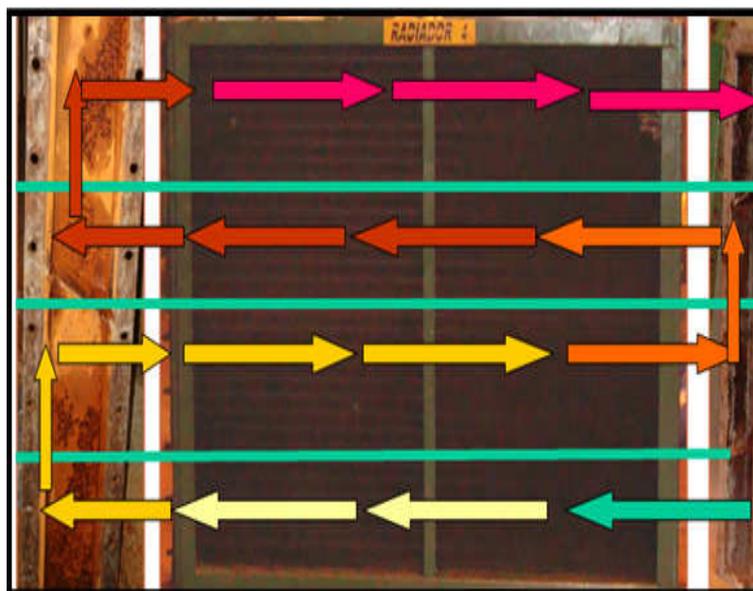


Figura 5.4: Passes do Trocador

Dentre estas intervenções foram realizadas algumas medidas que depois foram reavaliadas e desfeitas, como exemplo, voltar a adicionar cloro uma vez por dia para combater o excesso de incrustação nas tampas dos radiadores, esta medida foi reavaliada depois da constatação de sua baixa eficiência para este caso.

Outra medida revertida foi o fechamento da alimentação de água do sistema de resfriamento pelo filtro auto limpante 05, realizada no intuito de diminuir os sedimentos arrastados para este que poderiam ser em maior quantidade que para os outros quatro filtros, devido à forma de construção da barragem.

E por fim foi restabelecido o tempo entre as retro lavagens que tinha sido diminuído de 90 minutos para 30 minutos, procurando diminuir o intervalo para aumentar a eficácia da limpeza, ficando restabelecidos por fim os 90 minutos do projeto inicial.

- Comparação do Número de Paradas Anual Antes e Depois da Instalação do Sistema

Antes da instalação do sistema se analisado os últimos dez anos, 1998 a 2008, observa-se que se retirou em média a máquina 05, dez vezes por ano de operação para realizar limpeza nos trocadores de calor, enquanto que no ano de 2010 só foi realizada duas paradas da máquina em virtude de radiadores, sendo que as duas paradas foram apenas para inspeção dos elementos de limpeza, as escovas e não devido a um aumento de temperatura fora dos limites operacionais.

O quadro 5.3 mostra em valores quanto foi economizado em reais em um ano depois da instalação do sistema, foram calculados os últimos nove anos antes da instalação do sistema e levando em conta que cada parada custaria R\$ 6.000,00.

Quadro 5.3: Custos de Limpezas Manuais por Ano em R\$.

ANO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
R\$	36000	60000	96000	54000	90000	90000	54000	60000	24000

Calcula-se que depois da instalação do sistema em média, sem levar em consideração os custos da mão de obra e da reposição de geração térmica, a economia seria em torno de R\$ 62.666,00 por ano.

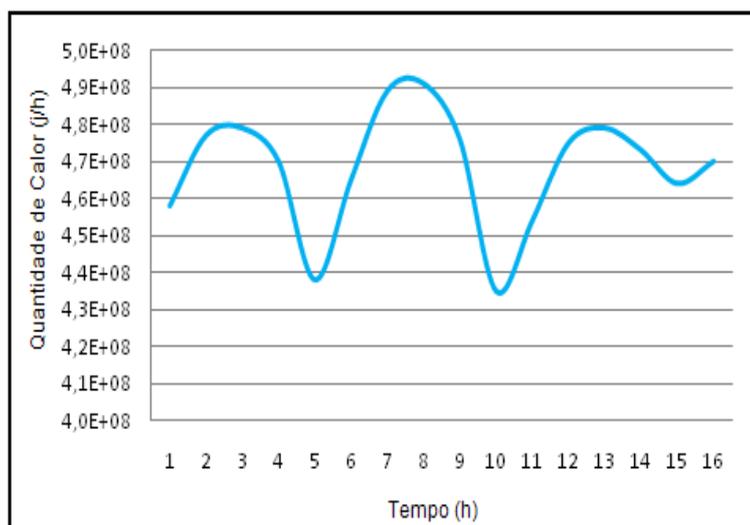
5.1.5 ANÁLISE TÉRMICA DO DESEMPENHO DOS TROCADORES DE CALOR

Para uma análise térmica mais focada devem-se usar os trocadores de número 03, um da máquina 05 a qual foi instalado o novo método de limpeza, e um da máquina 04 que ainda não fora instalado. A escolha do trocador de calor de número 03 deu-se por este, em ambas as unidades geradoras, estarem dispostos sob as saídas das fases A, B e V dos geradores,

Os parâmetros avaliados foram Quantidade de Calor Transmitido (Q), Temperatura de Saída do Fluido Frio (tfs), DTML¹, Coeficiente de Transferência de Calor (U) e a Efetividade (ϵ).

Os gráficos foram obtidos através de tabelas e fórmulas matemáticas com auxílio de uma planilha desenvolvida no software Excel.

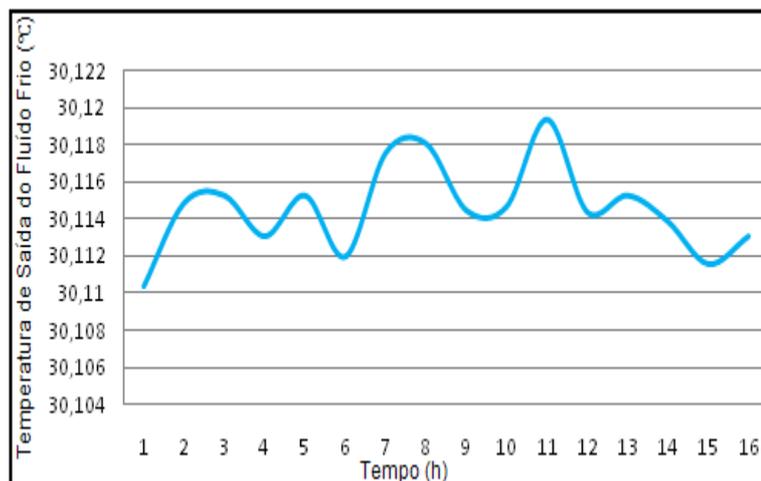
Gráfico 5.10: Quantidade de Calor Versus Tempo de Operação



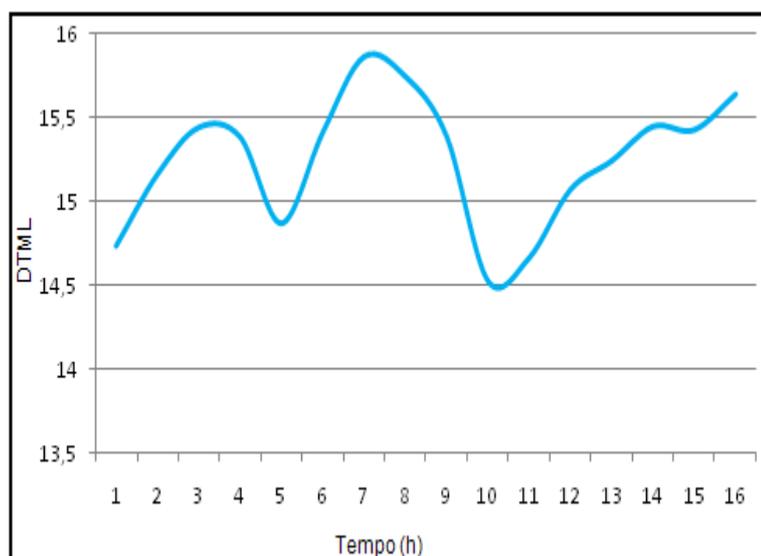
O Gráfico 5.10 acima demonstra a quantidade de calor trocado em relação ao tempo de operação, isto nas primeiras dezesseis horas de operação. Verifica-se que existe uma variação isto se explica, quando se leva em consideração que a geração de energia varia também para suprir a demanda, ocasionando este comportamento.

O Gráfico 5.11 demonstra a temperatura de saída do fluido frio, neste caso água, do trocador de calor 03 da máquina 05 em função do tempo de operação, nota-se pequenas variações para mais e para menos, contudo observa-se que é mantido na faixa de 30,1°C.

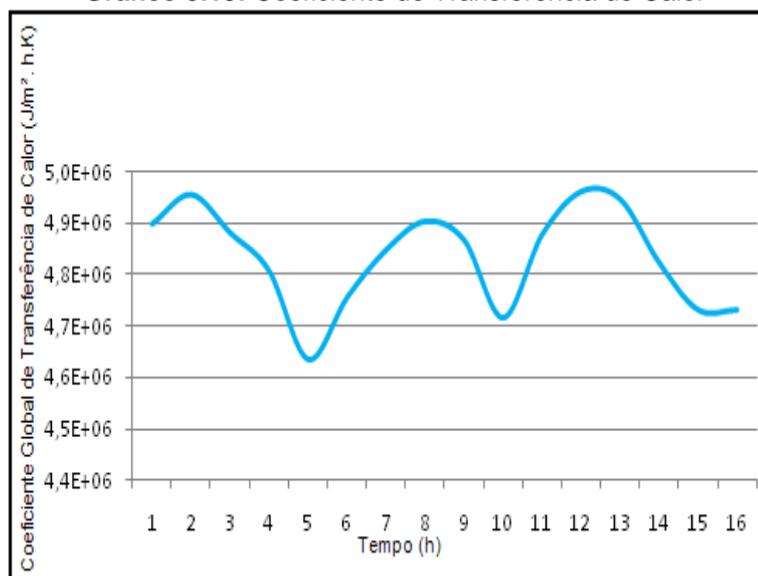
¹ Diferença de Temperatura Média Logarítima

Gráfico 5.11: Temperatura de Saída do Fluido Frio em Relação ao Tempo de Operação

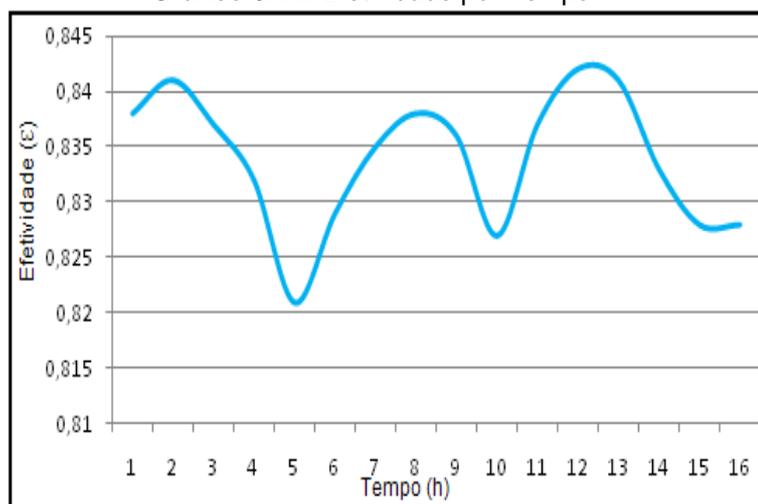
Observando o gráfico abaixo podemos observar que a DTML também se comporta de uma forma constante em relação ao tempo de operação não aparentando altas variações.

Gráfico 5.12: DTML em Função do Tempo

Ainda relacionando tempo de operação com variáveis do processo, verifica-se no Gráfico 5.13, que trata do coeficiente global de transferência de calor, pode-se observar um padrão com pequenas variações para mais ou para menos.

Gráfico 5.13: Coeficiente de Transferência de Calor

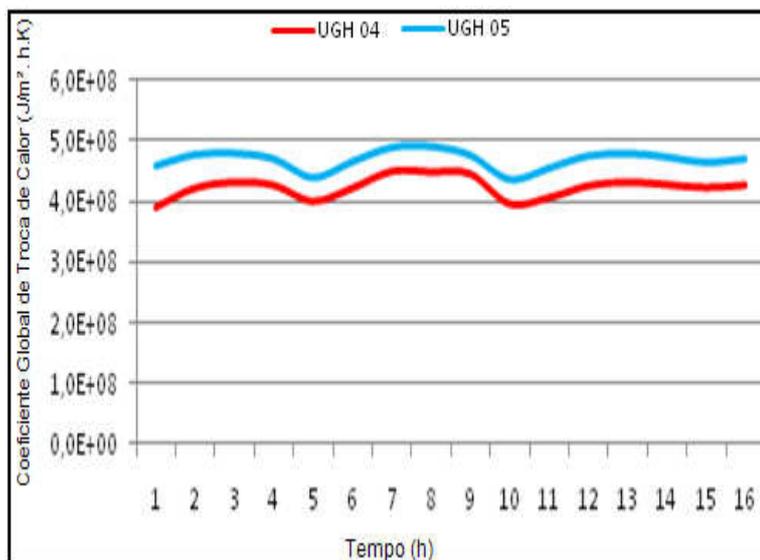
A efetividade foi também acompanhada durante este período e pode-se observar no Gráfico 5.14 que a mesma manteve-se em uma curva estável oscilando muito pouco em relação ao tempo.

Gráfico 5.14: Efetividade por Tempo

A partir de agora serão comparados os gráficos de desempenho do trocador de calor 03 da máquina 05 a qual esta funcionando com o novo sistema com os gráficos da máquina 04, que ainda não possui o sistema instalado, O Gráfico 5.15 mostra os perfis da quantidade de calor trocado, ou seja, energia transferida. Vê-se, no gráfico, que na máquina 04 o trocador de calor 03 em vermelho trocou menos

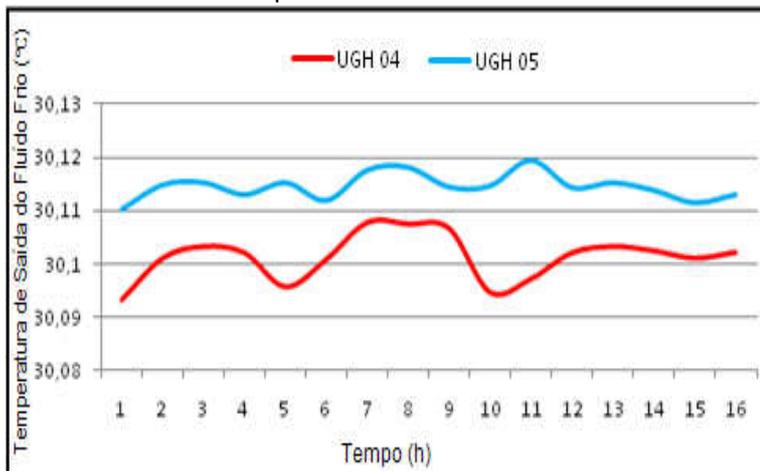
calor que o trocador 03 da máquina 05, com comportamentos muito parecidos, porém uma sensível melhora do trocador da máquina 05 em relação ao da máquina 04.

Gráfico 5.15: Comparativo do Coeficiente de Transferência de Calor

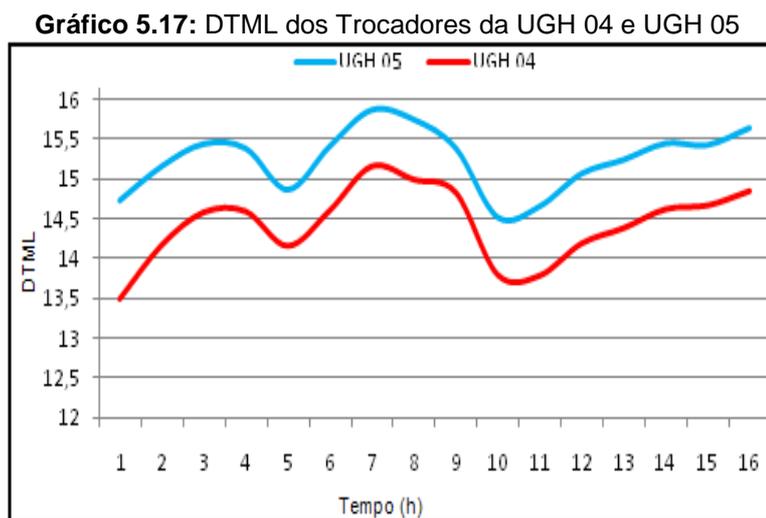


No Gráfico 5.16 foi realizada uma comparação entre os trocadores 03 das unidades Geradoras Hidráulicas 04 e 05, referente à temperatura de saída do fluido frio, observa-se que além da temperatura de saída do fluido frio da UGH 05 ser maior é mais estável que a da UGH 04, ou seja, maior troca de calor como já se tinha demonstrado no gráfico 5.15.

Gráfico 5.16: Temperaturas de Saída dos Fluidos Frios

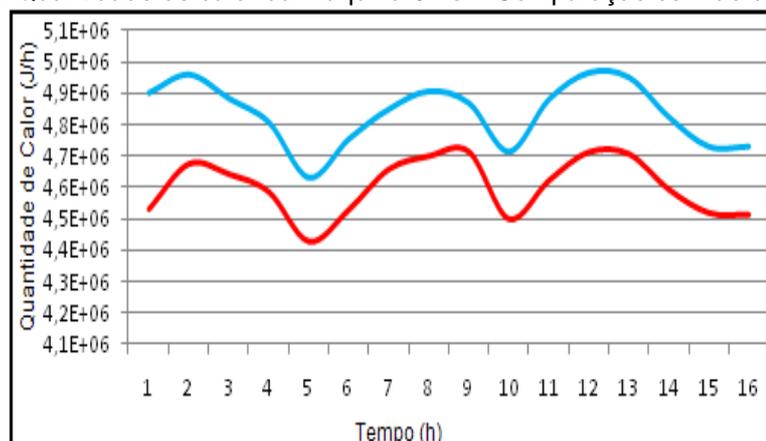


Dois perfis comparativos de DTML entre os trocadores de calor 03 das máquinas 04 e 05 foram esboçados no gráfico 5.17 e pode-se observar uma pequena diferença entre os trocadores das UGH'S, onde o da máquina 05 apresenta um valor um pouco acima do valor da máquina 04 relacionando com o tempo de funcionamento.

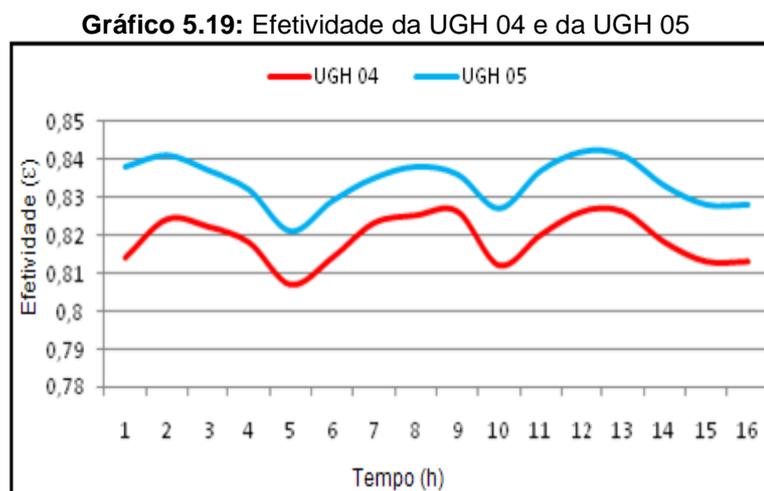


Foram calculados valores do coeficiente de transferência de calor dos trocadores de calor 03 das máquinas 04 e 05 e foi relacionado com o tempo de funcionamento estudado de onde se pôde observar que apesar de estarmos trabalhando com o mesmo tipo de trocador, e as mesmas variáveis de processo o trocador de calor da máquina 05 apresentou um melhor desempenho. Ver gráfico 5.18.

Gráfico 5.18: Quantidade de calor da Máquina 04 em Comparação com ao da Máquina 05



E finalmente, analisando o gráfico 5.19, quando comparados os dados obtidos de efetividade das máquinas 04 e 05, observa-se também uma melhor efetividade do trocador de calor 03 da máquina 05 quando comparado com o trocador de calor 03 da máquina 04 dentro do mesmo período de estudo.



CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES

Os elementos envolvidos no processo de resfriamento do Hidrogerador 05 da usina de Balbina formam um sistema aberto de água de resfriamento, com uma rede de oito trocadores de calor do tipo radiador ar/água, e a própria água de resfriamento que é captada diretamente do lago formado pela barragem.

1- Observou-se que o procedimento até então utilizado para remoção da incrustação dos tubos dos trocadores de calor do sistema de resfriamento do gerador da máquina 05 era um procedimento manual extremamente desgastante, economicamente ruim, pois havia a necessidade de parar a unidade geradora por aproximadamente 04 horas para realizar o procedimento e por fim era uma forma não eficaz de eliminação das incrustações.

2- O procedimento de limpeza até então utilizado não era eficaz, isso se comprova pelos dados levantados de parada de equipamentos para realização destas limpezas que apontam um número elevado de intervenções.

3- A melhor maneira de realizar a desincrustação é mecanicamente, mas de forma autônoma sem a necessidade de parar a máquina causando perdas de produtividade da usina.

4- 80% a menos de parada deste equipamento para realização de procedimento de limpeza dos trocadores de calor

5- A aplicação de um processo mecânico e autônomo de limpeza utilizando escovas de nylon e válvula de reversão controlada por relés e temporizadores, aumenta a produtividade de hidrelétricas uma vez que minimizariam a necessidade de interrupção do funcionamento das unidades geradoras para limpezas manuais de seus trocadores de calor, gerando uma economia de aproximadamente R\$ 62.666,00 anuais.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Análise da água em todos os meses do ano a fim de comprovar ou não a sazonalidade da possibilidade de aumento da incrustação e com isto poderia se diminuir os intervalos entre retro-lavagens aumentando a vida útil do sistema de limpeza automático dos radiadores.

Estudo das tampas dos trocadores de calor a fim de verificar a melhor geometria para minimizar a incrustação nestas, evitando uso de produtos químicos.

Avaliar se a diminuição da temperatura de operação aumentará ou não a vida útil do Gerador.

6.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antonio C. Caputo , P. M. (2007, Setembro 04). Heat exchanger design based on economic optimisation. *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 1151–1159 .

Araujo, c. d. (1978). *Transmissão de Calor*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e científicos.

Arteaga, R. C., Blanco, C. J., & Leite, J. C. (2010, Setembro 22). Análise para diminuição das perdas no processo de Geracao de Energia Elétrica da UHE - Balbina. *I CONEPRO SUL* , p. 12.

B. Glemmestad a, . S. (1998, Agosto 03). Optimal operation of heat exchanger networks. *Computers and Chemical Engineering* 23 (1999) 509–522 .

B. L. YEAP, D. I. (2004, Janeiro). MITIGATION OF CRUDE OIL REFINERY HEAT EXCHANGER. *Institution of Chemical Engineers Trans* .

Bejan, A. (1996). *Transferência de Calor*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda.

Bott, T. R. (1995). *Fouling of Heat Exchangers*. Nova York: Elsevier.

Bott, T. R. (1997, Agosto). Fouling of Heat Exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science* .

Brunnschweiler. (2010, Setembro 13). *Brunnschweiler*. Retrieved Setembro 13, 2010, from brunnschweiler: http://www.brunnschweiler.com.br/admin/arquivos/prod_01-12-2007_09-07-46trocadores.jpg.

C. O. Bennett, J. (1978). *Fenômenos de transporte de Quantidade de Movimeto, Calor e Massa*. São Paulo: McGraw-Hill.

CNI. (2010, Setembro 12). *CNI*. Retrieved Setembro 12, 2010, from CNI: <http://www.cni.org.br/portal/data/files/8A9015D015A0F71F0115AE4B9A37466D/Matriz%20Energ%C3%A9tica.pdf>.

Daher, S. J. (2003). *Avaliação da Incrustação de Sais Inorgânicos em Reservatórios Incosolidados Atraves da Simulação Numerica*. Macaé: Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF.

Duarte, P. S. (2009). *Metodologia Para Seleção de Aproveitamento Hidreletricos Com Aplicação da Lógica Fuzzy*. Itajubá: Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá.

Gentil, V. (2003). *Corrosao 4 edicao*. Rio de Janeiro: LTC.

Goldemberg, J., & Lucon, O. (2008). *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. São paulo: Editora da Universidade de São paulo.

Incropera, F. P., & Witt, D. P. (2003). *Fundamentos de Transferencia de Calor e Massa*. Rio de Janeiro: LTC.

InfoEscola. (2010, Setembro 13). *InfoEscola*. Retrieved Setembro 13, 2010, from InfoEscola Navegando e Aprendendo: <http://www.infoescola.com/energia/usina-hidreletrica/>.

J.M. Ponce-Ortega a, b. M.-G.-G. (2007, Fevereiro 23). Design and optimization of multipass heat exchangers. *Chemical Engineering and Processing* 47 (2008) 906–913 .

Kakaç, S., & Liu, H. (2002). *Heat exchangers : selection, rating, and thermal design*. New York: CRC PRESS.

Kreith, F. B. (2003). *Principios de Transferência de Calor*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

Kreith, F. (1977). *Princípios da Transmissão de Calor*. São Paulo: Edgard Blucher.

Marques, L. P. (2001). Oilfield Scale Problems: Evolution of Concepts and Lessons Learned in Campos Basin. *Aberdeen-Reino Unido* .

Paz, R. B. (2005). *Tratamento Químico da Água Para Redução dos Riscos Associados a Legionella em sistemas de Resfriamento Recirculantes*. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão-UEMA.

Porto, L. C. (2008). *Metodologia para Diagnosticar a Redução de Temperatura do Erolamento de Campo de Um Hidrogerador*. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Promptbrasil. (2011, Janeiro 17). *promptbrasil*. Retrieved Janeiro 17, 2011, from promptbrasil: <http://promptbrasil.com.br/aplali.htm>.

Rebeschini, J. (2010). *Avaliação de Aditivos Químicos para Dissolver Incrustação Inorgânica de Sulfato de Bário em Poços de Petróleo*. Campinas: Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica.

Reis, L. B. (2003). *Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade*. São Paulo, Brasil: Manole.

Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., & Cho, Y. I. (1998). *Handbook of Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill.

Romuald Guérin, G. R. (2006, Dezembro 30). Structure and rate of growth of whey protein deposit from in situ electrical. *Chemical Engineering Science* 62 (2007) 1948 – 1957 .

Shuang-Ying Wu, Y. C.-R.-L. (2007, Abril 24). The effect of fouling on thermodynamic performance. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 2399–2406 .

Teixeira, A. F. (2006). *A Geração de Energia Elétrica em um Modelo de Desenvolvimento Endogêno Para as Comunidades Isoladas do Interior do Estado do Amazonas*. Campinas: Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

Trovati, J. (2005). *Tratamento de Águas Industriais: Sistemas de Resfriamento*. São Paulo: Relatório Técnico.

UFRGS. (2010, Setembro 13). *UFRGS*. Retrieved Setembro 13, 2010, from UFRGS: <http://www.ufrgs.br/alimentus/feira/opconser/trocplac.htm>.

V.R. Radhakrishnan, M. R. (2007, Março 12). Heat exchanger fouling model and preventive maintenance. *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2791–2802 .

Vaporel. (2011, Janeiro 15). *Vaporel*. Retrieved Janeiro 15, 2011, from vaporel: <http://www.vaporel.pt/produtos/geradores/geradores.html>.

Videla, H. A. (2003). *Biocorrosão, Biofouling e Biodeterioração de Materiais*. São paulo: Edgard Blücher.

Westin, F. F. (2007). *Análise do Uso Turístico e a Gestão Integrada de Reservatórios Hidrelétricos Estudo de Caso da UHE Caconde – SP*. Itajubá: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de ItajubáJ - UNIFEI.

Wikimapia. (2011, Janeiro 17). *Wikimapia*. Retrieved Janeiro 17, 2011, from Wikimapia:<http://www.Wkimapia.org/#lat=-1.9206597&lon=-9.4693375&z=15&l=9&m=b>.

Wikipédia. (2010, Setembro 13). *Wikipedia*. Retrieved Setembro 13, 2010, from Wikipédia A enciclopédia Livre: http://pt.wikipedia.org/wiki/Trocador_de_calor.