

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**CEZAR ROGÉRIO GUEDES**

**APLICAÇÃO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE PARA  
OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO E REDUÇÃO DE  
FALHAS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2017**

**CEZAR ROGÉRIO GUEDES**

**APLICAÇÃO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE PARA  
OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO E REDUÇÃO DE  
FALHAS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Emerson Rigoni, Dr. Eng.

**CURITIBA**

**2017**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica  
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **APLICAÇÃO DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE PARA OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO E REDUÇÃO DE FALHAS DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

por

**CEZAR ROGÉRIO GUEDES**

Esta monografia foi apresentada em 10 de novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
Professor Orientador - UTFPR

---

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

---

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

Dedico este trabalho à minha família, meus amigos e, especialmente, à minha esposa Fernanda e à minha filha Yasmin que sempre me deram a força necessária para seguir em frente nos momentos de dificuldade.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por possibilitar esta conquista e sem o qual eu nada seria.

À minha família, pelo suporte nos momentos de desânimo e pela confiança na minha capacidade que sempre me transmitiram.

Aos colegas de trabalho que sempre me apoiaram.

Aos colegas de sala que sempre me ajudaram a superar os obstáculos.

Ao meu orientador, professor Dr. Emerson Rigoni, pelo apoio e por me mostrar o caminho a seguir nos momentos de indefinição.

Gostaria de deixar um agradecimento especial à minha esposa Fernanda, pelo apoio incondicional e à minha filha Yasmin que, com sua existência e seu carinho, sempre me deu energia e força para continuar.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível (Charles Chaplin).

## RESUMO

GUEDES, Cezar Rogério. **Aplicação da Engenharia de Confiabilidade para Otimização da Manutenção e Redução de Falhas de um Sistema de Bombeamento de Água.** 2017. 75 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Trabalho apresenta a aplicação de metodologias de engenharia de confiabilidade para reduzir os custos de manutenção e aumentar o rendimento do sistema de bombeamento de água para refrigeração de placas da área de Condicionamento de Placas da ArcelorMittal Tubarão. Atualmente este sistema apresenta alto número de falhas, gerando altos custos de manutenção de bombas e de motores e perdas de produção em função de indisponibilidade operacional e / ou baixo rendimento dos equipamentos. Apresenta um plano de ação que sirva como ferramenta para aumentar a disponibilidade operacional dos equipamentos deste sistema de bombeamento, aumentando o rendimento do sistema de bombeamento para otimizar a produção desta área operacional e reduzindo os custos de manutenção. Propõe-se também um planejamento de inspeção e de serviços para manutenção da confiabilidade dos equipamentos.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Custos da Manutenção. Análise de Falhas. Sistema de Bombeamento.

## ABSTRACT

GUEDES, Cezar Rogério. **Application of Reliability Engineering at Pump System Optimization and Fail Reduce**. 2017. 75 pages. Monograph (Reliability Engineering Specialization) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

This monograph consists in application of reliability engineering methodology to reduce maintenance costs and increase the efficiency of a water pump system to steel slabs refrigeration in the Slab Conditioning Area at ArcelorMittal Tubarão. Presently, this system shows a high number of fails, with high pumps and motors maintenance costs and production lacks caused by operational equipment unavailable and/or low efficiency of equipment. Will be show an implementation plan that can be used as a tool to increase equipment operational availability in this system, increasing pump system efficiency to production optimization and costs reducing. Will be create inspection and services plan too, to maintain equipment reliability.

**Palavras-chave:** Reliability. Costs of Maintenance. Fail Analysis. Pumping System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Sistema de recirculação de água .....	18
Fotografia 2. 1 – Leito de Resfriamento D .....	19
Fotografia 2.2 - Leito de Resfriamento A.....	19
Fotografia 2.3 - Resfriador de Placas.....	20
Fotografia 2.4 - Poço de Carepas .....	21
Fotografia 2.5 - Torre de Resfriamento .....	22
Fotografia 2.6 - Filtros autolimpantes .....	23
Fotografia 2.7 - Sistema de controle de vazão .....	24
Fotografia 2.8 - Clarifloculador .....	24
Figura 3. 1 - Ciclo FMECA.....	28
Figura 3. 2 - Tabela FMECA.....	29
Figura 3. 3 – Árvore de Falhas .....	30
Figura 3. 4 – Tabela de pesos.....	31
Figura 3. 5 – Matriz GUT.....	31
Figura 3. 6 – Diagrama de Causa e Efeito .....	32
Figura 3. 7 – Planilha 5W2H.....	32
Figura 3. 8 – Gráfico de Pareto .....	33
Figura 3. 9 – Densidade de probabilidade de falha (variação fator de forma) .....	34
Figura 4. 1 – Comparação dos valores atuais e desejados dos fatores .....	39
Figura 4. 2 – Densidade de Probabilidade de Falha - Geral.....	41
Figura 4. 3 – Probabilidade de Falha - Geral.....	42
Figura 4. 4 – Confiabilidade - Geral.....	42
Figura 4. 5 – Diagrama de Blocos da Análise RAM .....	44
Figura 4. 6 – Análise de Alocação.....	44
Figura 4. 7 – Relê de proteção especificado (SEL-751A) .....	48
Fotografia 4.1 - Tubulação retirada do sistema de arrefecimento .....	49
Fotografia 4. 2 – Base civil reparada.....	49

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1.1 - Evolução da produção .....	15
Gráfico 4. 1 – Gráfico de Pareto de falhas no CRALAM.....	40
Gráfico 4. 2 – Gráfico de Pareto de falhas em Sistemas Motor/Bomba .....	41
Quadro 2. 1 – Orçamento e execução de gastos com manutenção.....	25
Quadro 4. 1 – Parâmetros dos conjuntos .....	43
Quadro 4. 2 – Delineamento do Processo de Resfriamento Rápido .....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVA	15
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
<b>2</b>	<b>SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA DO CONDICIONAMENTO DE PLACAS</b>	<b>17</b>
2.1	SISTEMA DE RESFRIAMENTO CONTROLADO	18
2.2	SISTEMA DE RESFRIAMENTO NÃO CONTROLADO	20
2.3	SISTEMA DE RETORNO DE ÁGUA	21
2.4	TORRE DE RESFRIAMENTO	22
2.5	FILTROS AUTOLIMPANTES	23
2.6	SISTEMA DE CONTROLE VAZÃO	23
2.7	SISTEMA DE CLARIFLOCULAÇÃO / REPOSIÇÃO DE ÁGUA	24
2.8	MANUTENÇÃO	25
2.9	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	26
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE CAUSAS RAÍZES</b>	<b>27</b>
3.1	FERRAMENTAS QUALITATIVAS	27
3.1.1	“BRAINSTORMING”	27
3.1.2	FMECA – “FAILURE MODE, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS”	28
3.1.3	ANÁLISE POR ÁRVORE DE FALHAS (FTA – “FAULT TREE ANALYSIS”)	29
3.1.4	MATRIZ DE PRIORIZAÇÃO (GUT: GRAVIDADE, URGÊNCIA E TENDÊNCIA)	30
3.1.5	DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO (DIAGRAMA DE ISHIKAWA)	31
3.1.6	ANÁLISE DE FALHAS 5W (1H, 2H, 3H)	32
3.2	FERRAMENTAS QUANTITATIVAS	33
3.2.1	ANÁLISE DE PARETO	33
3.2.2	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA – LIFE DATA ANALYSIS)	34
3.2.3	ANÁLISE DE CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE (RGA – RELIABILITY GROWTH ANALYSIS)	35
3.2.4	DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)	36
3.2.5	ANÁLISE RAM (CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE, MANTENABILIDADE)	36
3.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	37
<b>4</b>	<b>IMPLANTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE - RCM</b>	<b>38</b>
4.1	ETAPA 0: ADEQUAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE	38

4.2	ETAPA 1: PREPARAÇÃO .....	39
4.3	ETAPA 2: SELEÇÃO DO SISTEMA E COLETA DE INFORMAÇÕES .....	40
4.4	ETAPA 3: ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA, SEUS EFEITOS E SUA CRITICIDADE (FMECA) .....	45
4.5	ETAPA 4: SELEÇÃO DAS FUNÇÕES SIGNIFICANTES E CLASSIFICAÇÃO DE SEUS MODOS DE FALHA.....	47
4.6	ETAPA 5: SELEÇÃO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO APLICÁVEIS E EFETIVAS .....	47
4.7	ETAPA 6: DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS INICIAIS E AGRUPAMENTO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO.....	48
4.8	ETAPA 7: REDAÇÃO DO MANUAL E IMPLEMENTAÇÃO .....	48
4.9	ETAPA 8: ACOMPANHAMENTO E REALIMENTAÇÃO .....	50
4.10	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

Face os desafios econômicos atuais e a necessidade que as empresas estão enfrentando para se manterem competitivas e atrativas do ponto de vista do retorno financeiro, a busca constante pela otimização de processos e a redução de custos sem perda de qualidade nos produtos e processos se torna essencial.

Inserida neste contexto, a manutenção tem se tornado objeto de estudo constante, tanto na busca pela redução de custos como na otimização das atividades e melhoria na qualidade para aumentar a disponibilidade operacional dos equipamentos.

As empresas mais desenvolvidas nestes estudos, tratam a manutenção dos equipamentos não como atividades paralelas, mas inseridas dentro do processo produtivo, e suas ações são oriundas de uma “Gestão de Ativos” baseada em metodologias baseadas em confiabilidade. Com análises, controles e acompanhamentos qualitativos e quantitativos.

### 1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

Na ArcelorMittal Tubarão, grande empresa do setor siderúrgico, produtora de placas semiacabadas e bobinas laminadas a quente, na área responsável pelo condicionamento das placas, existe um sistema fechado de água, responsável pelo resfriamento das mesmas.

Este sistema apresenta, atualmente, rendimento abaixo do esperado e índices de manutenção elevados, principalmente manutenção corretiva. O custo realizado com este sistema em 2016 servirá como base de referência, assim como a disponibilidade operacional de cada conjunto motor-bomba integrante deste sistema.

Dois fatores complicadores para este estudo são o levantamento do custo individual de cada equipamento e o levantamento do histórico de falhas, bem como seu nível de detalhamento e confiabilidade.

Para aumentar a disponibilidade, deverão ser propostas ações para redução das ocorrências de vibração excessiva nos conjuntos motor-bomba, propor melhorias nos sistemas de água de selagem das bombas, definição de ações

necessárias para reativação dos filtros autolimpantes de água de processo e redução do número excessivo de manobras operacionais nos motores das bombas.

Outro problema que também deve ser analisado neste trabalho é a qualidade das manutenções corretivas realizadas nos motores e, principalmente, nas bombas. Pois estes equipamentos têm apresentado falhas prematuras após as manutenções em oficina.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Criar um plano de ação, baseado nos preceitos da Engenharia da Confiabilidade, como ferramenta de gestão para aumentar a disponibilidade operacional dos equipamentos do sistema de bombeamento,

Consequentemente, aumentando o seu rendimento para otimizar a produção desta área operacional e reduzir os custos de manutenção, principalmente manutenção corretiva.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho deverá atender aos seguintes objetivos específicos, para cumprimento do seu objetivo geral:

- Levantar os modos de falhas mais críticos das bombas principais e definir plano de ação específico para aumento da confiabilidade deste item;
- Levantar os modos de falhas mais críticos dos motores principais e definir plano de ação específico para aumento da confiabilidade deste item;
- Definir plano de ação para reativação dos filtros autolimpantes de água de processo;
- Definir ações necessárias para melhorar a *performance* do sistema de água de selagem;
- Definir planos de inspeção eletromecânica necessários para gestão destes ativos, baseada em manutenção centrada em confiabilidade;

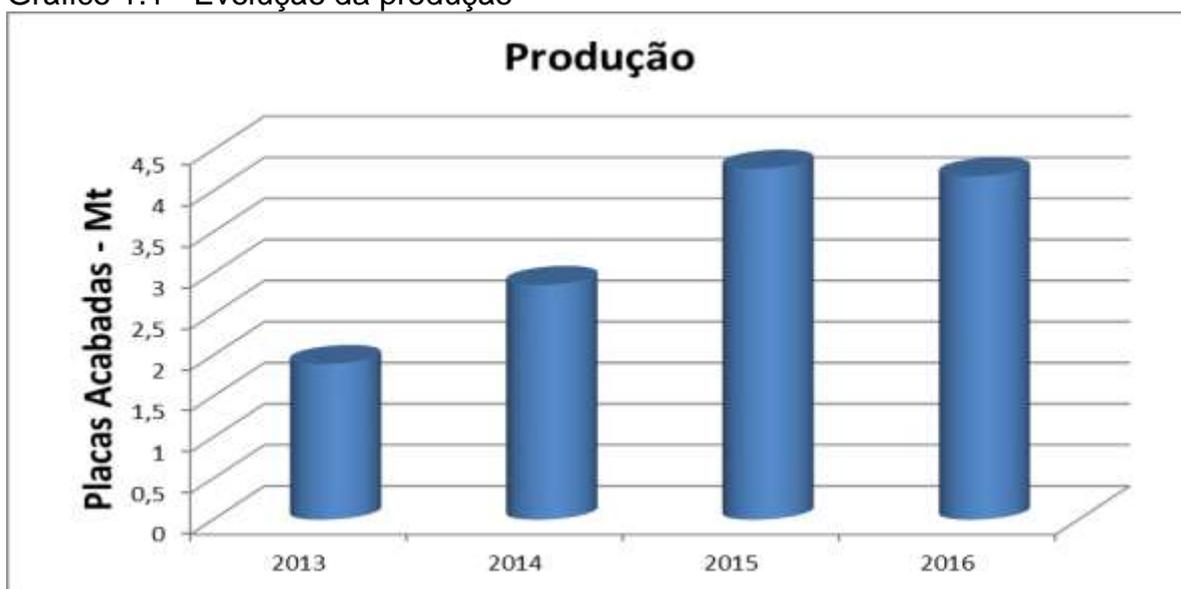
- Definir planos de serviços eletromecânicos necessários para gestão destes ativos, baseada em manutenção centrada em confiabilidade.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente este sistema apresenta alto número de falhas, gerando altos custos de manutenção de bombas e de motores e perdas de produção em função de indisponibilidade operacional e/ou baixo rendimento dos equipamentos.

A partir de 2013 houve um aumento de produção na área do Condicionamento de Placas, conforme pode ser visto no gráfico 1.1, elevando a produção de placas acabadas de 1,895Mt em 2013 para 4,178Mt em 2016, agravando os problemas e gerando custos extras de manutenção.

Gráfico 1.1 - Evolução da produção



Fonte: o autor (2017).

Houve a necessidade de aporte extra de verba no orçamento de aproximadamente 1 milhão de reais, representando aproximadamente 15% de todo o orçamento da área.

## 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Serão aplicadas metodologias para análise de falhas e identificação das fontes das mesmas (análise qualitativa). Também serão utilizadas metodologias para análise dos dados de vida dos equipamentos (análise quantitativa).

A análise qualitativa dos dados será utilizada para definição de plano de ação para mitigação/eliminação das causas raízes de falhas e a análise quantitativa será importante para avaliação geral do sistema quanto à necessidade de novos investimentos (curva: custos de manutenção x substituição de ativos) e definição de parâmetros para manutenções preventivas / preditivas.

Este plano de ação será o resultado deste estudo e será entregue a equipe de manutenção responsável pelos equipamentos desta área, para que as mesmas sejam implementadas.

Serão utilizadas ferramentas baseadas na metodologia de manutenção centrada em confiabilidade para elaboração deste trabalho.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No próximo capítulo, será apresentado o sistema de recirculação de água, com uma visão geral do processo e detalhes dos pontos importantes e significativos para o trabalho. Neste capítulo também será abordado os custos de manutenção atuais deste sistema.

No capítulo 3 serão apresentados métodos para análises quantitativas e qualitativas das falhas, que serão utilizados no trabalho. Estes métodos serão baseados em uma metodologia de manutenção centrada em confiabilidade.

No capítulo 4 será desenvolvido o trabalho, através do levantamento dos dados de histórico de falhas. Estes dados serão tratados e analisados com a ajuda das ferramentas adequadas e um plano de ação será criado. Também serão criados planos de inspeção e de serviços para manutenção da confiabilidade prevista para o sistema.

Por fim, no capítulo 5 será realizada uma estimativa de custos com os novos planos de manutenção indicados no capítulo anterior. Este capítulo também terá a conclusão do trabalho e propostas para trabalhos futuros neste processo.

## **2 SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA DO CONDICIONAMENTO DE PLACAS**

Neste capítulo será apresentado o sistema de recirculação de água e seus componentes básicos, de forma simplificada. Será detalhado os pontos importantes para o desenvolvimento do trabalho.

No final do processo de produção de placas de aço semiacabadas é necessário realizar o resfriamento das mesmas para posterior inspeção de qualidade, retirada de amostras, inspeção por ultrassom, escarfigem superficial, cortes para adequação dimensional, pesagem e marcação para despacho.

O resfriamento das placas de aço é feito por um sistema de bombeamento de água, através de um circuito fechado de água composto por uma Torre de Resfriamento, um Poço de Carepas, um Resfriador de Placas e dois Leitos de Resfriamento Controlado.

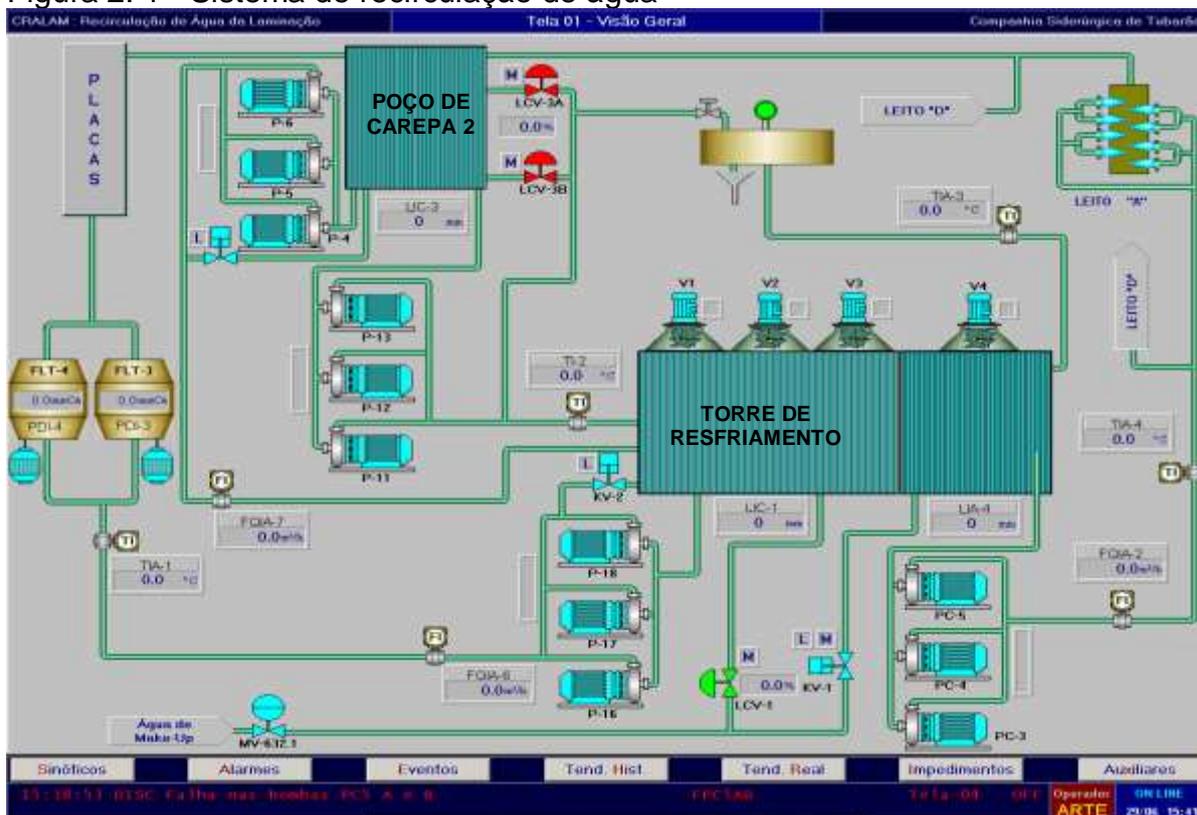
Toda a circulação de água é realizada por bombas. A operação destas bombas é feita através de um sistema supervisorio localizado na cabine de operação, porém o sistema opera de forma manual, ou seja, o controle da vazão de água no Resfriador e nos Leitos fica nas mãos do operador, bem como o controle dos níveis de água no Poço de Carepas e na Torre de Resfriamento. Em função disto, ocorre um elevado número de comando de partidas e paradas destas bombas, ocasionando um elevado número de falhas, uma vez que os motores são acionados por partida direta (sem equipamentos eletrônicos de controle de partida e velocidade). Além de demandar muito tempo dos operadores para monitoração dos níveis e acionamento das bombas.

Atualmente este sistema apresenta alto número de falhas, gerando altos custos de manutenção de bombas e de motores e perdas de produção em função de indisponibilidade operacional e / ou baixo rendimento dos equipamentos.

No ano de 2016 houve um aumento na demanda deste sistema, em função do aumento de produção na área do Condicionamento de Placas, agravando os problemas e gerando custos extras de manutenção, causando a necessidade de aporte extra de verba no orçamento de aproximadamente 1 milhão de reais, representando aproximadamente 15% de todo o orçamento da área do Condicionamento de Placas.

A Figura 2.1 apresenta uma visão geral do sistema de água.

Figura 2. 1 - Sistema de recirculação de água



Fonte: o autor (2017).

Nesta Figura pode-se visualizar todos os componentes principais do Sistema de Recirculação de água. Em destaque temos as bombas principais da Torre de Resfriamento e do Poço de Carepas, componentes fundamentais para este processo.

## 2.1 SISTEMA DE RESFRIAMENTO CONTROLADO

Alguns tipos de aço produzidos na empresa não podem sofrer variações bruscas de temperatura, em função de suas propriedades físico-químicas. As placas com estes tipos de aço necessitam um tratamento diferenciado para seu resfriamento, sendo necessário controlar cada etapa deste processo através do tempo de resfriamento.

O resfriamento destas placas pode ocorrer através de perda de temperatura ao ar livre, mescla de ar livre e água, campanulas (fossas térmicas para reduzir a velocidade da perda de temperatura) e ar livre ou ainda campanulas, ar livre e água.

Estes tipos de resfriamento, chamados de resfriamentos controlados, ocorrem, principalmente, nos Leitos de Resfriamento “A” e “D”.

A Fotografia 2.1 mostra o Leito de Resfriamento Controlado D.

Fotografia 2. 1 – Leito de Resfriamento D



Fonte: o autor (2017).

Estes leitos são responsáveis por receber as placas quentes provenientes do Lingotamento Contínuo e armazená-las para posterior envio ao Resfriador de Placas ou resfria-las de forma controlada.

A Fotografia 2.2 mostra o Leito de Resfriamento Controlado A.

Fotografia 2.2 - Leito de Resfriamento A



Fonte: o autor (2017).

As bombas responsáveis por abastecer estes leitos são as bombas PC3, PC4 e PC5. Elas são acionadas em partida direta por motores verticais de 220 kW e tensão de alimentação de 3,3 kV. Estas bombas possuem uma vazão nominal de 1.100 m<sup>3</sup>/h.

## 2.2 SISTEMA DE RESFRIAMENTO NÃO CONTROLADO

Outros tipos de aço, com propriedades físico-químicas menos restritas, podem ser resfriados de modo não controlado. Estas placas são enviadas para o Resfriador de Placas, onde são resfriadas diretamente a água.

As bombas responsáveis por abastecer o Resfriador de Placas são as bombas P16, P17 e P18. Elas são acionadas em partida direta por motores verticais de 800 kW e tensão de alimentação de 3,3 kV.

O Resfriador é composto de 6 correntes que transportam as placas dentro de uma câmara fechada. Dentro desta câmara existem “headers”, que são tubulações com bicos spray para direcionar pequenos jatos de água para a superfície das placas, resfriando-as de forma uniforme. Estas bombas possuem uma vazão nominal de 4.800 m<sup>3</sup>/h.

A Fotografia 2.3 mostra o Resfriador de Placas.

Fotografia 2.3 - Resfriador de Placas



Fonte: o autor (2017).

Pode ser visto o Resfriador sendo carregado com placa de aço não controlado. Estas placas podem sofrer resfriamento de forma quase que imediata, sem nenhuma restrição.

### 2.3 SISTEMA DE RETORNO DE ÁGUA

Após trocar calor com a superfície das placas, toda a água proveniente do Resfriador e dos Leitos de Resfriamento é direcionada para um Poço de Carepas. Este poço possui uma área de decantação, onde os resíduos sólidos (carepas provenientes das placas) descem para o fundo em função de sua maior densidade e são coletadas por uma ponte rolante e encaminhadas para a área de subprodutos/reaproveitamento.

A Fotografia 2.4 mostra o Poço de Carepas.

Fotografia 2.4 - Poço de Carepas



Fonte: o autor (2017).

A água é direcionada por transbordamento para a área de sucção das bombas de retorno. Nesta área, existem 6 bombas para retornar a água para a Torre de Resfriamento. Destas bombas, a P11, P12 e P13 são acionadas em partida direta por motores de 450 kW e tensão de 3,3 kV e as bombas P4, P5 e P6 são acionadas em partida direta por motores de 160 kW e tensão de 3,3 kV. As bombas de 160 kW

possuem vazão nominal de 1.100 m<sup>3</sup>/h e as bombas de 450 kW possuem vazão nominal de 4.800 m<sup>3</sup>/h.

## 2.4 TORRE DE RESFRIAMENTO

A Torre de Resfriamento recebe a água de retorno do Poço de Carepas. A água recebida passa por um sistema de grelhas onde troca calor com o ar, que é succionado por 4 ventiladores instalados na parte superior da torre.

Após passar pelas grelhas a água é contida na área de sucção das bombas, onde é enviada novamente para o Resfriador e para os Leitos de Resfriamento.

A Fotografia 2.5 mostra a Torre de Resfriamento:

Fotografia 2.5 - Torre de Resfriamento



Fonte: o autor (2017).

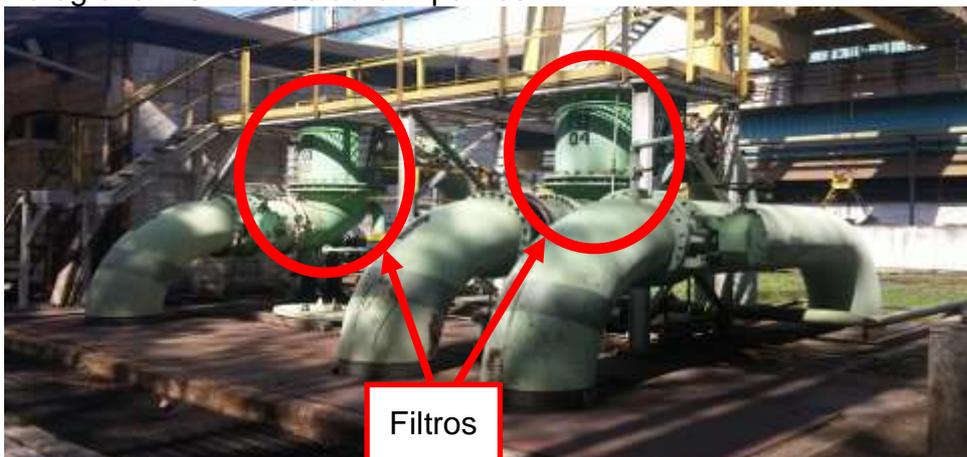
Desta forma, o circuito de água de refrigeração é fechado e a água recircula trocando calor com as placas de aço e dissipando a energia retirada destas através de troca de calor com o ar.

## 2.5 FILTROS AUTOLIMPANTES

A água que sai da Torre de Resfriamento em direção ao Resfriador de Placas passa pelos filtros autolimpantes, para que possíveis resíduos sólidos sejam retirados da mesma e não sejam enviados para os “headers”.

A Fotografia 2.6 mostra os filtros autolimpantes.

Fotografia 2.6 - Filtros autolimpantes



Fonte: o autor (2017).

Estes filtros são importantes para o rendimento do Resfriador, pois os orifícios de passagem de água dos “headers” são muito pequenos e podem entupir com muita facilidade, causando redução de vazão, o que provoca aumento no tempo de resfriamento e resfriamento desigual da superfície da placa, gerando redução de dilatação desigual, causando problemas de qualidade por empeno das placas.

## 2.6 SISTEMA DE CONTROLE VAZÃO

O sistema que controla o balanceamento de vazão de água no Resfriador é totalmente manual, composto por válvulas acionadas por motores elétricos, comandados por botoeiras manuais.

Estas válvulas controlam a vazão de água no Resfriador através de zonas de resfriamento. Existem 7 zonas superiores e 7 zonas inferiores. É fundamental que as vazões sejam equivalentes para não ocorrer empeno de placas por causa de resfriamento desigual de superfície.

A Fotografia 2.7 mostra os painéis de controle de vazão das zonas de resfriamento do Resfriador de Placas.

Fotografia 2.7 - Sistema de controle de vazão



Fonte: o autor (2017).

Para auxiliar o operador no controle de vazão, existem placas de orifício nas tubulações e pressostatos diferenciais para indicação local da diferença de pressão entre entrada e saída de cada placa de orifício.

## 2.7 SISTEMA DE CLARIFLOCULAÇÃO / REPOSIÇÃO DE ÁGUA

Atualmente, a área do Condicionamento de Placas recebe a água proveniente da retrolavagem dos filtros do sistema de água de uma área adjacente, o Lingotamento Contínuo. Esta água é recebida no Clarifloculador, onde recebe adição de produtos químicos para controle de qualidade e passa por um sistema de decantação.

A Fotografia 2.8 mostra o Clarifloculador.

Fotografia 2.8 - Clarifloculador



Fonte: o autor (2017).

A água, após ser tratada e separada de resíduos sólidos é direcionada para dois possíveis destinos:

- ✓ Torre de Resfriamento: a água é adicionada a água do circuito de resfriamento de placas para suprir as perdas do sistema;
- ✓ ETA Reuso: a água é encaminhada para a estação de tratamento de água de reuso da usina e disponibilizada para demais áreas.

## 2.8 MANUTENÇÃO

A manutenção nos equipamentos do sistema de recirculação de água é responsabilidade da equipe de manutenção da área do Condicionamento de Placas. Esta equipe é responsável pela elaboração e cumprimento dos planos de inspeção e serviços preditivos, preventivos e corretivos.

Esta equipe realiza os serviços no campo, porém as manutenções nos conjuntos, tais como motores, bombas e válvulas são substituídos pela equipe de manutenção e enviados para manutenção nas Oficinas Centrais da empresa e/ou empresa especializada externa.

O histórico dos equipamentos e informações correlatas são registrados em um sistema interno de controle de manutenção chamado de SISMANA.

Todos os gastos com manutenção são controlados e confrontados com um orçamento elaborado no ano anterior. As discrepâncias, tais como falhas e gastos não previstos são explicados nas reuniões técnicas e de acompanhamento de custo com a estrutura gerencial.

A Tabela 2.1 mostra os valores orçados e os valores executados com manutenção nos anos de 2016 e 2017 (até o mês de abril).

Quadro 2. 1 – Orçamento e execução de gastos com manutenção

2016	Valor	2017	Valor
<b>Orçamento</b>	R\$ 428.689,00	<b>Orçamento</b>	R\$ 604.295,40
<b>Executado</b>	R\$ 1.408.340,26	<b>Executado</b>	R\$ 67.450,00
<b>Não orçado</b>	R\$ 979.651,26	<b>Não orçado</b>	-

Fonte: o autor (2017).

## 2.9 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O Sistema de Recirculação de Água do Condicionamento de Placas (CRALAM) é parte fundamental do processo de acabamento de placas. Sua função é realizar o resfriamento das placas de aço para permitir o condicionamento das mesmas. Atualmente este sistema está apresentando elevado número de falhas e custos de manutenção bem acima dos valores estimados.

O conhecimento do processo é fundamental para um estudo de manutenção centrada em confiabilidade, pois permite a identificação dos equipamentos críticos e dos gargalos operacionais e é primordial nas análises qualitativas.

O entendimento da condição atual dos equipamentos e seus respectivos custos de manutenção também são muito importantes. Pois ajuda a priorizar o local das análises e a sequência de implantação dos itens do plano de ação.

No próximo capítulo serão apresentadas as ferramentas a serem utilizadas neste trabalho para aplicação da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade. O correto entendimento de cada uma delas e as aplicações indicadas para a mesma são muito importantes.

A metodologia será aplicada aos equipamentos descritos neste capítulo com utilização das ferramentas apresentadas no capítulo a seguir. Estas ferramentas podem ser qualitativas e quantitativas.

### 3 ANÁLISE DE CAUSAS RAÍZES

Neste capítulo serão apresentadas, de forma simplificada, algumas ferramentas qualitativas e quantitativas que serão utilizadas ao longo do trabalho para aplicação da metodologia proposta.

Para análise da condição atual e proposta de melhorias para aumento da confiabilidade do sistema estudado, foram utilizadas várias ferramentas para análise de causas raízes das falhas.

Parte das ferramentas trata de análises qualitativas, que focam na análise das causas básicas dos problemas e levam a tomadas de decisão sobre o que incluir num plano de ação para bloqueio da causa ou minimização dos impactos da mesma.

Também serão utilizadas ferramentas quantitativas, para determinação da confiabilidade atual do sistema, identificar gargalos e definir componentes prioritários para serem tratados no plano de ação.

#### 3.1 FERRAMENTAS QUALITATIVAS

Este item apresenta as ferramentas qualitativas que serão utilizadas para definição das causas básicas de falhas nos componentes, subsistemas e sistemas.

##### 3.1.1 “*BRAINSTORMING*”

O brainstorming consiste numa ferramenta poderosa para levantamento de informações. Pode ser utilizado em diversas etapas do estudo de confiabilidade e associado a várias ferramentas. Sua utilização é simples e muito eficaz, pois consegue reunir e associar informações de todos os participantes do processo.

Consiste, basicamente, em permitir, de forma organizada e estruturada, que todos os envolvidos deem sua contribuição na análise de um determinado efeito e/ou evento.

Existem diversas formas de se estruturar a utilização da ferramenta para que se possa atingir o melhor resultado possível, mas o conceito principal é que num primeiro momento, todas as informações sejam levadas em consideração e não

devem ser discutidas nesta primeira etapa. Posteriormente, cada item será analisado criteriosamente e então é decidido se procede com o mesmo ou se descarta.

### 3.1.2 FMECA – “FAILURE MODE, EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS”

Uma ferramenta de análise qualitativa extremamente utilizada para identificação dos modos de falha possíveis e seus impactos no processo. É extremamente útil na busca por ações que bloqueiem ou, pelo menos, minimizem a probabilidade de ocorrência de falhas e seus respectivos efeitos indesejados (Rigoni, 2017).

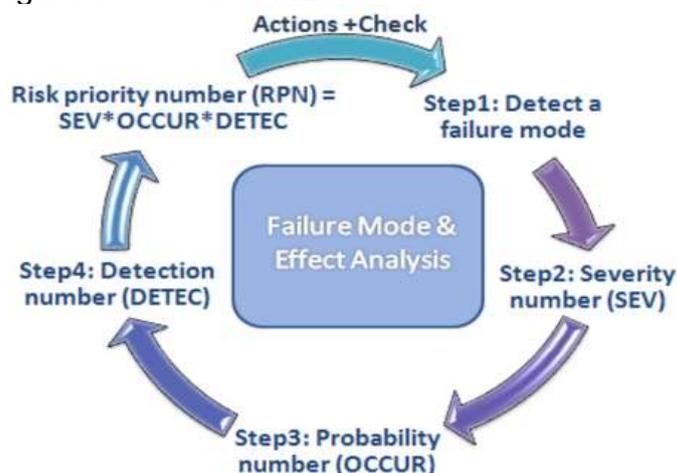
O FMECA pode ser utilizado em variadas formas:

- Para reduzir a probabilidade de falha em novos produtos e/ou processos;
- Para reduzir a probabilidade de falhas potenciais (ainda não ocorreram) em produtos e/ou processos já em operação;
- Para reduzir os riscos de erro e aumentar a qualidade em procedimentos administrativos;
- Para aumentar a confiabilidade de produtos e/ou processos em operação através da análise de falhas que já ocorreram (Industria Hoje, 2017).

Esta última aplicação é que será desenvolvida neste trabalho, uma vez que desejamos aumentar a confiabilidade do Sistema de Recirculação de Água através de ações para bloqueio ou minimização de falhas que já ocorreram.

A Figura 3.1 demonstra os passos a serem seguidos para elaboração e acompanhamento de um FMECA.

Figura 3. 1 - Ciclo FMECA



O FMECA é desenvolvido em uma tabela onde são inseridas as falhas, seus impactos e é realizada uma classificação das mesmas, baseada em pesos numéricos atribuídos na probabilidade de ocorrência, impacto e detecção de cada modo de falha.

A Figura 3.2 mostra um exemplo de tabela FMECA.

Figura 3. 2 - Tabela FMECA

		① F.M.E.A - ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS ( ) PROJETO DE PRODUTO ( ) REVISÃO DO PROJETO DE PRODUTO ( ) PROJETO DO PROCESSO ( ) REVISÃO DO PROJETO DO PROCESSO		GERÊNCIA														
CLIENTE/REF ②		APLICAÇÃO		FOLHA														
DATA ULT. VER. PROJ.		PRODUTO / PROCESSO		DATA DA ELABORAÇÃO														
		FURNEDOR		DATA DA PRÓXIMA REVISÃO														
ITEM	NOME DO COMPONENTE/ PROCESSO	FUNÇÃO DO COMPONENTE/ PROCESSO	FALHAS POSSÍVEIS			ATUAL				AÇÃO CORRETIVA		RESULTADO						
			MODO	EFEITO(S)	CAUSA(S)	CONTROLES ATUAIS	ÍNDICES				RECOMEN- DAÇÕES	TOMADA	ÍNDICES REVISITOS			RESPONSÁVEL		
③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	O	G	D	R	⑩	⑪	O	G	D	R	⑫	
<b>PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA</b>			<b>GRAVIDADE</b>			<b>PROBABILIDADE DE DETECÇÃO</b>				<b>RISCO</b>								
*Muito Remota ..... 1			*Apenas Perceptível ..... 1			* Muito Alta ..... 1				*Baixo ..... 1 a 135								
*Muito Pequena ..... 2			*Pouca Importância ..... 2 e 3			* Alta ..... 2 e 3				*Moderado ..... 135 a 500								
*Pequena ..... 3			*Moderadamente Grave ..... 4 a 6			* Moderada ..... 4 a 6				*Alto ..... 501 a 1.000								
*Moderada ..... 4,5,6			*Grave ..... 7 e 8			* Pequena ..... 7 e 8												
*Alta ..... 7 e 8			*Extremamente Grave ..... 9 e 10			*Muito Pequena ..... 9												
*Muito Alta ..... 9 e 10						*Remota ..... 10												

Fonte: Indústria Hoje, 2017

Essa classificação é muito útil para determinar a prioridade de cada ação dentro do plano de ações.

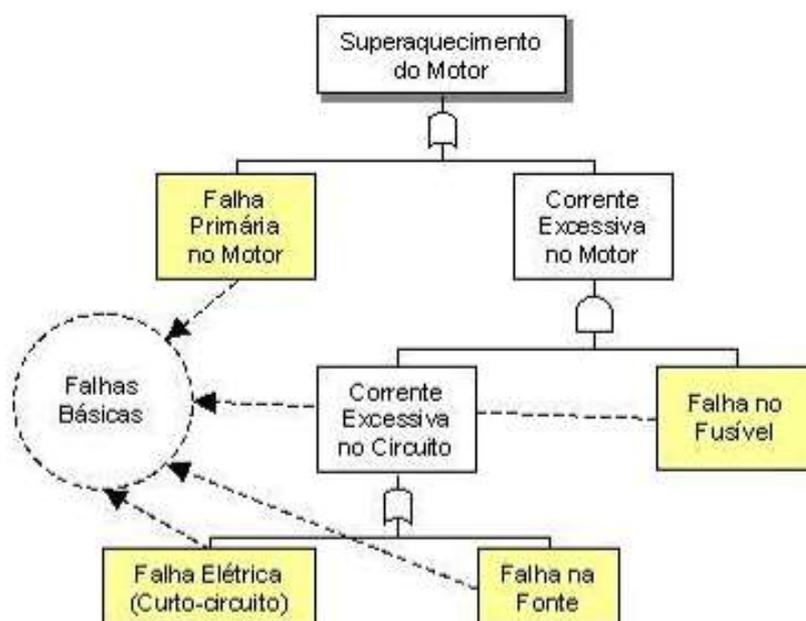
### 3.1.3 ANÁLISE POR ÁRVORE DE FALHAS (FTA – “FAULT TREE ANALYSIS”)

A árvore de Falhas é uma ferramenta destinada a determinar as causas básicas das falhas. Ou seja, utiliza técnica dedutiva de pensamento reverso para, partindo de um efeito indesejado chegar às condições que o causaram (Qualidade Online, 2017).

Esta ferramenta foi desenvolvida inicialmente para a Força Aérea Americana e deve levar em consideração todo e qualquer evento pertinente que pode ser causador do efeito indesejado analisado (Rigoni, 2017).

A Figura 3.3 mostra um exemplo de uma árvore de falhas.

Figura 3.3 – Árvore de Falhas



Fonte: Qualidade Online, 2017

Os eventos causadores devem ser analisados e associados a outros eventos. Na montagem do diagrama devem ser associados os eventos de forma que fique claro se os mesmos são interdependentes e podem causar o efeito de forma isolada ou dependente de outros eventos/condições para que o efeito ocorrer. Para tal, é utilizado um fluxograma com representação gráfica da interdependência dos eventos.

#### 3.1.4 MATRIZ DE PRIORIZAÇÃO (GUT: GRAVIDADE, URGÊNCIA E TENDÊNCIA)

A matriz de priorização é importante para definição das prioridades dos modos de falha a serem tratados.

A priorização deve ser feita através da análise de três fatores importantes: a gravidade do efeito do modo de falha, a relação com o tempo disponível ou necessário para tratamento do problema e a tendência de crescimento, redução ou desaparecimento do problema/modo de falha.

Cada um destes três fatores deve ser avaliado e um peso deve ser atribuído, conforme tabela mostrada na Figura 3.4. Depois, os pesos de cada fator devem ser multiplicados, gerando um peso final para comparação entre os modos de falha.

Figura 3. 4 – Tabela de pesos

Pontos	Gravidade	Urgência	Tendência
5	Prejuízos ou Dificuldades Extremamente Graves	Necessária uma ação imediata	Se nada for feito, o agravamento será imediato
4	Muito Graves	Com alguma urgência	Vai piorar a curto prazo
3	Graves	O mais cedo possível	Vai piorar a médio prazo
2	Pouco Graves	Pode esperar um pouco	Vai piorar a longo prazo
1	Sem Gravidade	Não tem pressa	Não vai piorar ou pode até melhorar

Fonte: Rigoni, 2017

Uma planilha final é montada com todos os modos de falha estudados e seus respectivos pesos, conforme mostra a Figura 3.5.

Figura 3. 5 – Matriz GUT

Matriz de Priorização - Matriz GUT						
Assunto/Problema:						
Coordenador:			Equipe:			
Problema	G	U	T	Total	Priorização	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Fonte: Rigoni, 2017

Os modos de falha de maior peso devem ter suas causas básicas identificadas e tratadas prioritariamente.

### 3.1.5 DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO (DIAGRAMA DE ISHIKAWA)

Ferramenta muito útil para determinação de causas de um determinado efeito. Principalmente quando o número é relativamente alto, pois permite a organização destas causas em famílias.



Segue abaixo o significado de cada letra:

- W (what): o quê deve ser feito;
- W (when): quando deve ser feito;
- W (who): quem deve fazer;
- W (where): onde deverá ser feito;
- W (why): por quê deve ser feito;
- H (how): como deve ser feito;
- H (how many): quantas vezes deve ser feito;
- H (how much): quanto irá custar.

### 3.2 FERRAMENTAS QUANTITATIVAS

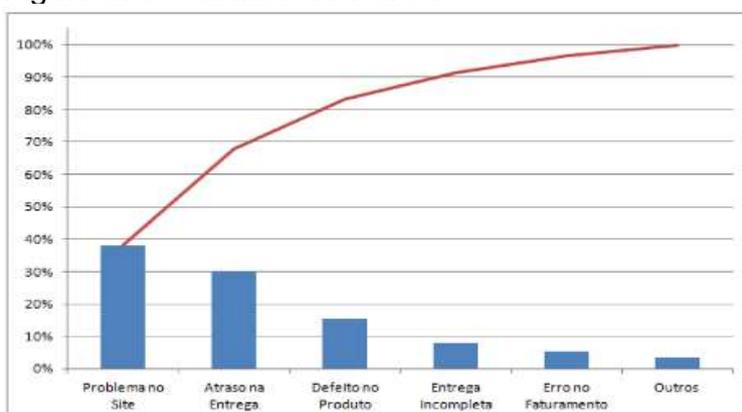
Este item apresenta as ferramentas quantitativas que serão utilizadas para análise da confiabilidade, taxa de falhas e *performance* dos componentes, subsistemas e sistemas.

#### 3.2.1 ANÁLISE DE PARETO

O maior objetivo desta ferramenta é determinar os fatores relevantes, através da ordenação das causas e/ou efeitos. Desta forma, priorizando as análises e as ações de melhoria.

A Figura 3.8 mostra um exemplo de um gráfico de Pareto.

Figura 3. 8 – Gráfico de Pareto



Fonte: Rigoni, 2017

Através de uma análise Figura 3.8, podemos visualizar um dos princípios desta ferramenta: 80% das consequências advêm de 20% de causas.

### 3.2.2 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA – LIFE DATA ANALYSIS)

O objetivo desta ferramenta é tentar fazer previsões a respeito da vida de produtos/componentes de um sistema/processo.

Para tal, é necessário coletar informações de um grupo de componentes grande o suficiente para que os resultados estatísticos possam representar a população no intervalo de confiança necessário (Reliasoft, 2017).

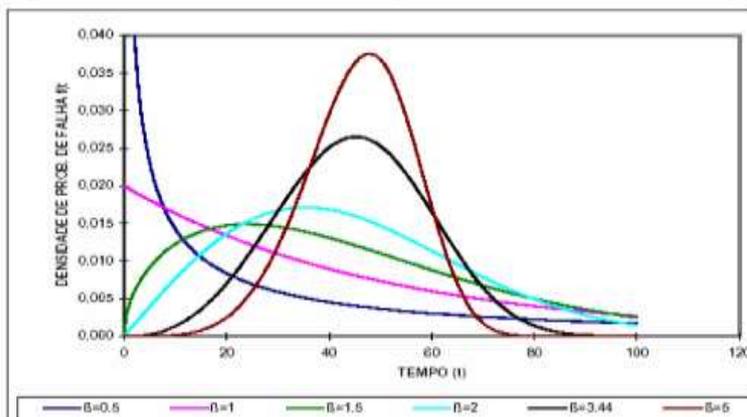
As informações coletadas devem ser tratadas, de forma a definir a distribuição estatística que melhor representa os resultados. Esta distribuição é útil para estimar parâmetros importantes a respeito da *performance* dos produtos/componentes estudados.

Para realização de uma análise de dados de vida é necessário: coletar histórico dos dados de vida de um determinado componente/produto, selecionar a distribuição estatística que melhor representa os dados de vida, estimar os parâmetros que vão definir a distribuição dos dados (parâmetros de forma, parâmetros de amplitude, etc.) e gerar os gráficos e calcular os resultados que estimam a vida característica com produto/componente (Reliasoft, 2017).

A Figura 3.9 mostra um exemplo de distribuição estatística dos dados de vida de um determinado componente.

Figura 3.9 – Densidade de probabilidade de falha para diferentes valores do parâmetro de forma.

Figura 3.9 – Densidade de probabilidade de falha (variação fator de forma)



Fonte: Kardilson, 2006.

Através da análise dos dados de vida, podemos extrair informações importantes, tais como (Reliasoft, 2017):

- Confiabilidade para um momento determinado;
- Probabilidade de falha para um momento determinado;
- Vida média;
- Taxa de falha;
- Vida acima de determinada confiabilidade (tempo de garantia);
- Função densidade de falha;
- Função de confiabilidade;
- Função taxa de falha;
- Etc.

### 3.2.3 ANÁLISE DE CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE (RGA – *RELIABILITY GROWTH ANALYSIS*)

A análise de crescimento da confiabilidade é aplicada em processos estocásticos, principalmente no desenvolvimento de produtos. Na engenharia de manutenção é aplicada no estudo de sistemas reparáveis, sendo inclusive, uma ferramenta para ajudar na decisão do momento ideal para uma substituição dos componentes/sistemas. Também pode ser identificado o melhor momento para um reparo geral do sistema.

Através desta análise é possível determinar o nível de manutenção necessário para manter/adequar o sistema a uma confiabilidade dentro de parâmetros aceitáveis.

Para este estudo, podem-se utilizar modelos de análise tradicionais, como: Crow-AMSAA (NHPP), Duane, Standard Gompertz, Lloyd Lipow, Modified Gompertz e Logistic. Estes modelos ajudam na análise de informações fundamentais, como tempo até falha, dados de confiabilidade e também dados discretos (Spanó, 2017).

### 3.2.4 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)

Esta ferramenta se baseia na condução sistemática de experimentos para aumentar a compreensão de um processo novo ou existente. Utiliza cálculos estatísticos e matemática avançada para modelamento matemático do processo através da determinação da função que melhor descreve o comportamento de uma ou mais saídas, dependentes em maior ou menor grau de fatores manipuláveis (Shimura, 2017).

Tem como objetivo a maximização do aprendizado com um mínimo de recursos.

O DOE é de grande utilização, pois ajuda no conhecimento do processo, na determinação dos ativos mais importantes para o produto final e ajuda na priorização das ações a serem implementadas. Também pode ser utilizado na determinação de procedimentos operacionais, como poderá ser visto neste trabalho.

### 3.2.5 ANÁLISE RAM (CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE, MANTENABILIDADE)

A análise RAM tem como objetivo avaliar o desempenho de um componente/sistema. É de fundamental importância, pois nos permite identificar os equipamentos críticos, do ponto de vista da confiabilidade (Mazzei, 2017).

É uma ferramenta poderosa, pois nos permite uma análise bastante completa do sistema e, principalmente, de forma integrada ao processo. Essa integração é fundamental na determinação dos pontos/componentes que devem ser tratados para alcançar a confiabilidade necessária do sistema, de acordo com as necessidades de *performance* operacional do sistema como um todo.

Outra grande vantagem desta ferramenta é a capacidade de análise da *performance* de manutenção dos ativos. É possível determinar o grau de resultados mínimos da manutenção, para alcance da *performance* necessária (Mazzei, 2017).

Essa avaliação é bastante interessante, pois expande a análise dos componentes para a equipe de manutenção, sendo, inclusive, possível a identificação de uma necessidade de mudanças na mesma. Seja no número de pessoas, nas especialidades necessárias e/ou no nível de conhecimento/experiência das mesmas.

Também podemos expandir a análise para os recursos de manutenção necessários, tais como sobressalentes, equipamentos auxiliares, contratação de equipes especializadas, etc.

### 3.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Para a implantação do RCM faz-se necessário a utilização de ferramentas. Estas ferramentas podem ser qualitativas (brainstorming, FMEA/FMECA, árvore de falhas, matriz GUT, diagrama de causa e efeito, planilha 5W1H/2H/3H) ou quantitativas (Pareto, LDA, RGA, DOE, RAM).

Cada uma destas ferramentas é importante para determinadas fases de um processo de implantação de RCM. Desde a análise do desempenho atual dos componentes/sistemas, o entendimento das causas básicas que estão levando a este desempenho, a definição dos componentes/sistemas a terem suas análises priorizadas, a identificação de ações mitigadoras, a priorização destas ações, o acompanhamento da implementação destas ações e, finalmente, o desempenho após a implantação do RCM.

Neste trabalho, todas estas ferramentas serão utilizadas e auxiliará em todo o processo de implementação do RCM. Portanto, o entendimento destas ferramentas é fundamental para o entendimento do trabalho e suas definições serão utilizadas durante todo o estudo.

No próximo capítulo iniciaremos a aplicação destas ferramentas de forma metodológica, seguindo uma ordem lógica para entendimento da situação atual, entendimento das causas que estão levando o desempenho atual a ficar abaixo do desejado, priorização dos equipamentos a serem analisados neste primeiro momento, definição das causas de falhas e proposta de plano de ação para correção dos problemas identificados e a gestão da execução deste plano de ação.

Todo o trabalho consiste na utilização destas ferramentas, de modo metodológico e ordenado, visando foco nos resultados desejados e com aplicação nos equipamentos críticos. Para tal, estas ferramentas serão implementadas de acordo com o que foi apresentado no capítulo anterior (entendimento do processo).

## 4 IMPLANTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE - RCM

Nesta capítulo serão utilizadas as ferramentas apresentadas no capítulo anterior, para implantação da metodologia proposta. É o capítulo fundamental do trabalho, onde a RCM será de fato aplicada em um sistema real.

A implementação de uma manutenção centrada em confiabilidade é bastante complexa e demanda uma análise detalhada em todas as suas fases, desde a identificação dos problemas até a determinação da ação mitigadora e garantia operacional dentro de parâmetros aceitáveis, de acordo com as exigências operacionais.

Para facilitar este processo, foi utilizada uma metodologia baseada em etapas de implementação. Parte destas etapas serão concluídas neste trabalho, as demais etapas serão analisadas e será proposta uma metodologia de implantação.

Agregadas a este processo, foram identificadas algumas melhorias significantes que já haviam sido mapeadas e, algumas delas, já se encontravam em processo de implantação. Estas melhorias foram incluídas no trabalho, uma vez que são de grande importância para todo o processo e, conseqüentemente, para o subsistema que será utilizado como projeto piloto para a implantação do RCM.

### 4.1 ETAPA 0: ADEQUAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

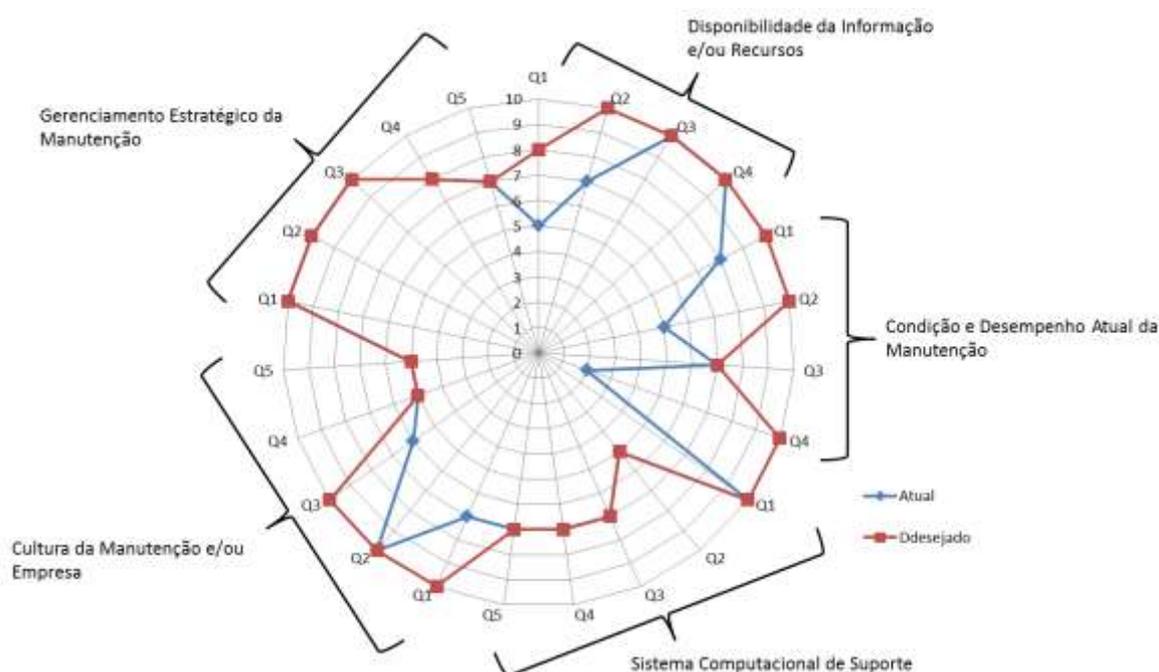
Nesta etapa o objetivo é avaliar se a manutenção centrada em confiabilidade é realmente indicada para o processo/subsistema estudado e se a gestão da manutenção e seus colaboradores são adequados (Rigoni, 2017).

A análise foi dividida em alguns critérios de avaliação, onde foram definidos valores desejáveis e atuais para cada fator, numa escala de 01 a 10. Estes valores foram definidos em consenso pela equipe de confiabilidade da área de manutenção, composta por 2 especialistas e 4 assistentes técnicos de especialidade elétrica e mecânica.

Os critérios de avaliação e seus respectivos fatores podem ser vistos no Apêndice A, assim como a planilha 5W1H com o plano de ação para adequação dos fatores considerados abaixo do valor.

A Figura 4.1 apresenta o resultado da avaliação.

Figura 4. 1 – Comparação dos valores atuais e desejados dos fatores



Fonte: Autor, 2017

Como pode ser visto na Figura 4.1, a maior concentração de fatores a serem tratados está na condição e desempenho atual da manutenção. O que implica num plano de ação com maior foco em treinamento da equipe.

Todo o questionário utilizado nesta etapa com as devidas respostas se encontra no Apêndice A.

## 4.2 ETAPA 1: PREPARAÇÃO

Os objetivos desta etapa são preparar, organizar e estruturar a equipe responsável pela implantação do RCM. Também é fundamental a previsão orçamentária e a definição da estratégia de implementação que será adotada (Rigoni, 2017).

Para este trabalho foi adotado método de implementação por projeto piloto e a estratégia de implementação de análise expedita por categoria. Para montagem da equipe, foram incluídos colaboradores de todas as áreas que possuem interface direta ou indireta com este processo, tais como: operação, manutenção, confiabilidade, etc.

Foram definidos o patrocinador interno, os facilitadores e toda a equipe envolvida. As reuniões entre os integrantes serão semanais e cada reunião terá duração de 2 horas.

Os itens do plano de ação serão avaliados e orçados individualmente e será analisada a forma como cada um será inserido na previsão orçamentária da equipe de manutenção da área.

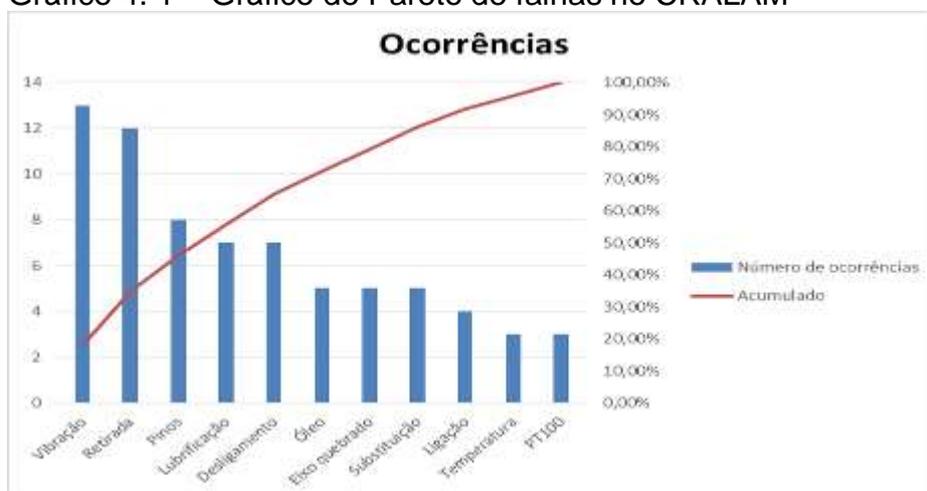
Todos os detalhes do estudo efetuado nesta etapa, bem como as equipes, o patrocinador e os facilitadores se encontram no Apêndice B.

#### 4.3 ETAPA 2: SELEÇÃO DO SISTEMA E COLETA DE INFORMAÇÕES

Nesta etapa, os objetivos principais são a definição do sistema a ser estudado, como projeto piloto, e a coleta de informações sobre o comportamento atual do mesmo (Rigoni, 2017).

Inicialmente foi elaborado um Gráfico de Pareto, conforme pode ser visto no Gráfico 4.1, com todas as falhas ocorridas no Sistema de Recirculação de Água do Condicionamento de Placas (CRALAM) no ano de 2016.

Gráfico 4. 1 – Gráfico de Pareto de falhas no CRALAM



Fonte: Autor, 2017

Através da análise deste gráfico, fica evidente que as falhas se concentram nos sistemas de acionamento motor/bomba, uma vez que as falhas: vibração, retirada, pinos, lubrificação, eixo quebrado, PT100 são relacionadas a estes sistemas.

Para comparação entre estes sistemas, foi elaborado um novo Gráfico de Pareto, como pode ser visto no Gráfico 4.2.

Gráfico 4. 2 – Gráfico de Pareto de falhas em Sistemas Motor/Bomba



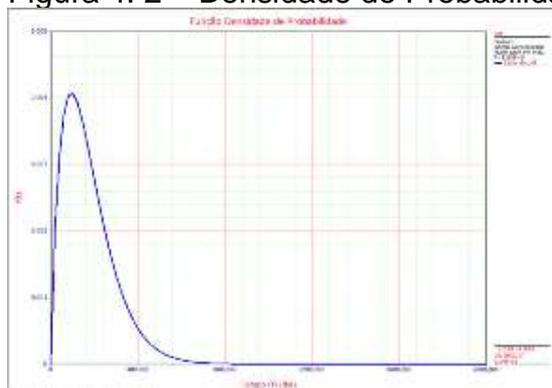
Fonte: Autor, 2017

Neste Gráfico de Pareto, pode-se notar que a maioria dos problemas nestes sistemas se encontram nos conjuntos montados no Poço de Carepas 2, onde estão localizados os conjuntos P11, P12, P13, P4, P5 e P6.

Este sistema é composto por 6 bombas principais, 3 bombas são acionadas por motores de 450 kW de potência (P11, P12 e P13) e 3 por motores de 160 kW de potência (P4, P5 e P6). A similaridade entre as falhas ocorridas nestes 6 conjuntos de motor-bomba também foi importante na definição desta área como piloto. Outro fator determinante foi que as ações de melhoria que serão propostas para este sistema também poderão ser aplicadas nas bombas da Torre de Resfriamento.

Foi levantado o histórico detalhado de falhas nestes componentes. Para análise dos dados foi utilizada ferramenta de LDA e calculado, via software, os dados gerais de comportamento de todos os conjuntos instalados no Poço de Carepas 2, A densidade de probabilidade de falha de todos os conjuntos motor/bomba deste subsistema pode ser vista na Figura 4.2.

Figura 4. 2 – Densidade de Probabilidade de Falha - Geral

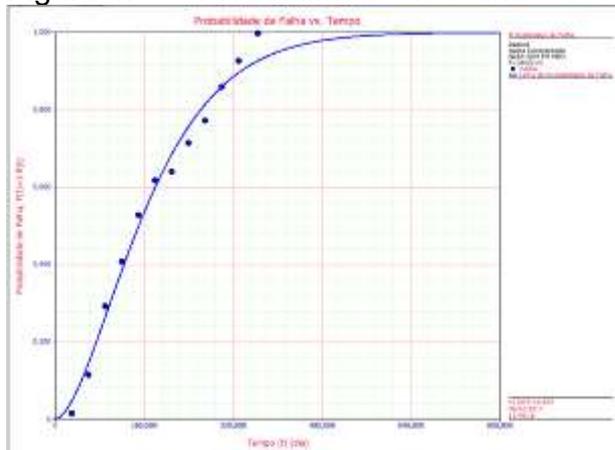


Fonte: Autor, aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Pode-se notar claramente que a probabilidade do sistema está alta, com grande concentração de falhas em um curto período de tempo.

A Figura 4.3 mostra o gráfico da probabilidade de falha.

Figura 4. 3 – Probabilidade de Falha - Geral

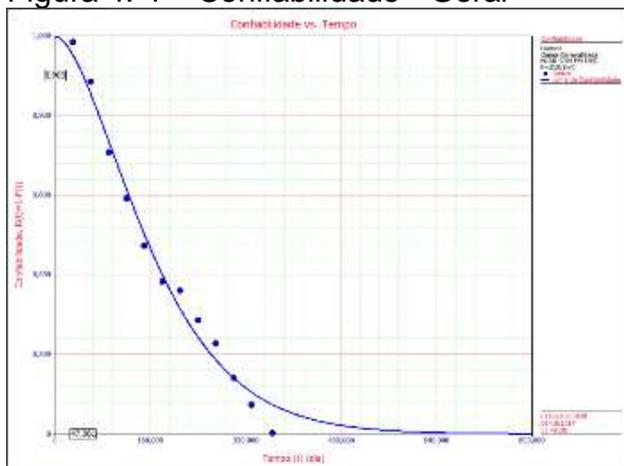


Fonte: Autor, aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Pode-se notar que em aproximadamente 06 meses a probabilidade de falha chega a 50%.

A Figura 4.4 mostra o gráfico da confiabilidade do subsistema.

Figura 4. 4 – Confiabilidade - Geral



Fonte: Autor, aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Pode-se verificar que a probabilidade cai abaixo de 90%(valor meta) após 47 dias. O que demonstra claramente que o sistema está com *performance* abaixo do necessário.

Os parâmetros de indicação do comportamento da vida dos conjuntos são mostrados No quadro 4.1.

Quadro 4. 1 – Parâmetros dos conjuntos

	P11	P12	P13	P4	P5	P6
Beta	1,456547	1,327608	1,604786	1,934528	1,209545	1,540892
Lambda	0,105365	0,062932	0,011345	0,006424	0,079406	0,026229

Fonte: Autor, 2017

Após o levantamento da *performance* atual de cada conjunto do sistema, foi realizado um DOE do processo de resfriamento rápido, para determinar o ponto de operação ideal, de acordo com as necessidades operacionais. O quadro 4.2 mostra os cenários delineados.

Quadro 4. 2 – Delineamento do Processo de Resfriamento Rápido

Ordem Padrão	A:Vazão Água (m <sup>3</sup> /h)	B:Temp. Água (°C)	C:Tempo Permanência (min)	Temperatura Placa
1	4500	45	15	89
2	5500	45	15	62
3	4500	55	15	94
4	5500	55	15	67
5	4500	45	25	58
6	5500	45	25	51
7	4500	55	25	61
8	5500	55	25	56

Fonte: Autor, aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

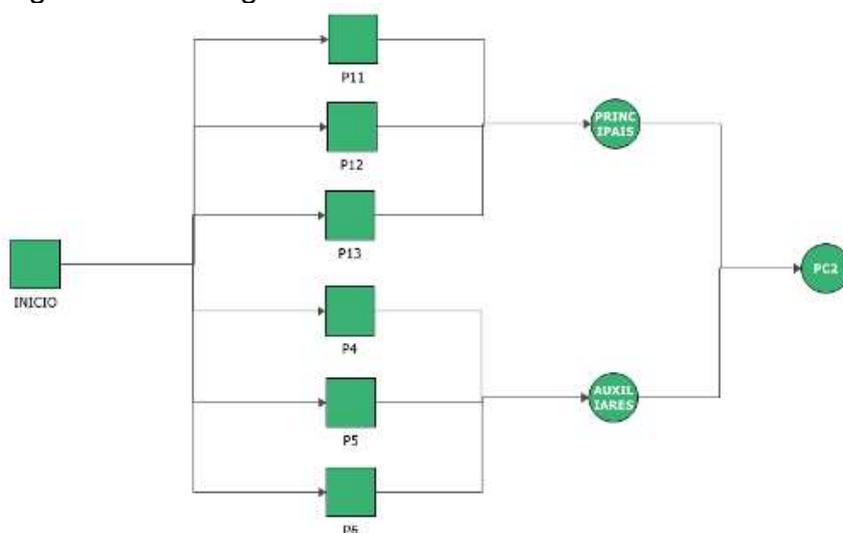
Após o delineamento, foram identificados três cenários operacionais possíveis, um focando em máxima produtividade, outro focando em racionamento de recursos (água e energia) e outro intermediário. Como o sistema deve ter capacidade de funcionamento em qualquer cenário, foi considerado o pior caso (maior necessidade operacional), ou seja, o cenário com foco em produtividade operacional. Neste cenário, a vazão necessária é de 5.500 m<sup>3</sup>/h, que somadas a uma vazão constante de resfriamento lento (3.200 m<sup>3</sup>/h) leva a uma necessidade operacional de 2 bombas de 4.000 m<sup>3</sup>/h e 2 bombas de 2.500 m<sup>3</sup>/h. Ou seja, a todo instante necessita-se de 2 conjuntos motor/bomba de cada modelo, desta forma a configuração atual de 2 conjuntos operando e 1 conjunto *standby* é viável.

Todos os resultados do delineamento podem ser verificados no Apêndice C deste trabalho.

De posse dos parâmetros e da definição do contexto operacional, foi possível utilizar Análise RAM para determinar a confiabilidade atual do sistema e a confiabilidade desejada para cada componente, de acordo com os custos de

manutenção (utilizada análise de alocação de custo otimizado) e viabilidade de cada conjunto. A Figura 4.5 mostra o Diagrama de Blocos utilizado na análise RAM.

Figura 4. 5 – Diagrama de Blocos da Análise RAM



Fonte: Autor, aplicação do Blocksim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Para a análise de alocação, responsável por determinar a confiabilidade atual e desejada de cada conjunto, foi determinado que a confiabilidade total do sistema deveria ser de 0,9 (90%). Os custos de reparo foram utilizados de acordo com o histórico fornecido pela equipe de manutenção mecânica (R\$ 120.000,00 para os conjuntos P11/P12/P13 e R\$ 80.000,00 para P4/P5/P6). A viabilidade foi baseada na posição física de cada conjunto, onde alguns conjuntos possuem maior interferência com outros componentes do sistema, causando maior tempo e dificuldade de reparo/substituição. A Figura 4.6 mostra o resultado da análise de alocação realizada, é possível identificar que todos os conjuntos estão apresentando baixa confiabilidade e necessitam de ações para que possam atingir a confiabilidade mínima desejada.

Figura 4. 6 – Análise de Alocação

RBD1 (Custo Otimizado)						
Nome do Bloco	Confiabilidade Máx. Alcançável	Viabilidade	IC (365)	Confiabilidade (365)	Confiabilidade Desejada (365)	Unidades em Paralelo Equivalentes *
P12	1	Moderado (6)	0,282041	0,769235	0,821678	1,175817
P11	1	Moderado (5)	0,296516	0,794226	0,850839	1,203517
P13	1	Difícil (7)	0,30909	0,82003	0,840994	1,072217
P4	1	Fácil (1)	0,310955	0,86735	0,94204	1,40987
P5	1	Fácil (2)	0,243052	0,744151	0,866424	1,476769
P6	1	Fácil (3)	0,285688	0,809279	0,861997	1,195264
Resultados do Sistema						
Confiabilidade (365)	Confiabilidade Desejada (365)	Unidades				
0,806315	0,9	Dia				

Fonte: Autor, aplicação do Blocksim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Todas as definições à respeito desta etapa, bem como todas as análises de todos os conjuntos motor/bomba estão detalhados no Apêndice D deste trabalho.

#### 4.4 ETAPA 3: ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA, SEUS EFEITOS E SUA CRITICIDADE (FMECA)

Foi elaborado um FMECA completo para o sistema de bombeamento do Poço de Carepas 2, onde foram analisados todos os modos de falha possíveis, que levam os componentes do sistema a uma falha funcional total ou parcial.

Como falha total de um componente, foi considerado o não bombeamento de água por algum dos conjuntos motor/bomba. Para falha parcial, foi considerado o bombeamento de um dos conjuntos com vazão abaixo da nominal. Esta vazão foi determinada de acordo com os manuais da planta, que indicam 4.000 m<sup>3</sup>/h para as bombas P11, P12 e P13 e 2.500 m<sup>3</sup>/h para as bombas P4, P5 e P6.

Para análise das causas básicas dos modos de falha, foram utilizados o Diagrama de Ishikawa (falhas mecânicas) e FTA (falhas elétricas).

As causas básicas levantadas foram:

- Elétricas
  - Falha na montagem
  - Final de vida útil
  - Alto número de partidas
  - Falha de proteção
  - Falha de arrefecimento
  - Falha de proteção de arrefecimento
- Mecânicas
  - Falha de pré-montagem da bomba
  - Falha de montagem da bomba em campo
  - Arrefecimento ineficiente
  - Falta de água de arrefecimento
  - Final de vida útil
  - Lubrificação ineficiente

Abaixo, seguem os modos de falha mais significativos (NPR  $\geq$  200), as causas imediatas levantadas e as ações de controle existentes:

- Motor elétrico em falha
  - Curto circuito do enrolamento do motor para terra
    - ✓ Inspeção preditiva realizada por equipe especializada
    - ✓ Medição de isolamento durante manutenções preventivas
  - Curto circuito entre espiras do enrolamento do motor
    - ✓ Inspeção preditiva realizada por equipe especializada
    - ✓ Medição de isolamento durante manutenções preventivas
  - Gaiola de esquilo do motor aberta
    - ✓ Não possui
  - Sistema de proteção elétrica atuando indevidamente
    - ✓ Inspeção sensível
    - ✓ Calibração periódica com equipe especializada
- Bomba em falha
  - Falha em componentes internos da bomba
    - ✓ Inspeção sensível
    - ✓ Análise preditiva de vibração
  
  - Acoplamento montado com gap errado
    - ✓ Acompanhamento de montagem
- Motor elétrico com baixo torque
  - Gaiola de esquilo do motor com resistência alta
    - ✓ Não possui
- Bomba com baixo rendimento
  - Falha em componentes internos da bomba
    - ✓ Inspeção sensível
    - ✓ Análise preditiva de vibração

O FMECA completo, a FTA do motor elétrico e o Diagrama de Ishikawa da falha na bomba se encontram no Apêndice E deste trabalho.

#### 4.5 ETAPA 4: SELEÇÃO DAS FUNÇÕES SIGNIFICANTES E CLASSIFICAÇÃO DE SEUS MODOS DE FALHA

Nesta etapa, todos os modos de falha significantes ( $NPR \geq 200$ ) foram classificados, de acordo com seus respectivos efeitos. Estes efeitos foram classificados de acordo com três critérios:

- Efeito evidente
- Efeito que afeta segurança e/ou meio ambiente
- Efeito com consequências econômicas e/ou operacionais

Baseado nestes critérios cada modo de falha foi codificado com a sigla EEO (evidente econômico operacional). Pois todos os efeitos são evidentes (perceptíveis pela equipe operacional) e afetam a produção do setor.

Nenhum dos efeitos representa riscos à segurança e/ou meio ambiente.

No Apêndice F pode ser visto a planilha com a classificação.

#### 4.6 ETAPA 5: SELEÇÃO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO APLICÁVEIS E EFETIVAS

Após a definição e classificação de todos os modos de falhas críticos ( $NPR \geq 200$ ) o grupo se reuniu para discutir as causas básicas e as tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas na mitigação dos modos de falha.

Foi utilizada novamente a ferramenta do *Brainstorming* para levantamento das tarefas de manutenção.

Após análise pela equipe, ficou determinado que as tarefas de manutenção aplicáveis aos modos de falha totais são as mesmas para os modos de falha parciais (tanto para causas elétricas como para causas mecânicas).

O detalhamento das tarefas de manutenção se encontra no Apêndice G deste trabalho.

#### 4.7 ETAPA 6: DEFINIÇÃO DOS INTERVALOS INICIAIS E AGRUPAMENTO DAS TAREFAS DE MANUTENÇÃO

Os intervalos iniciais foram definidos pela equipe com base em manuais dos fabricantes, experiência da equipe de manutenção e especialistas e histórico de manutenção dos conjuntos.

O agrupamento das tarefas e a definição das oportunidades de execução foram facilitados pela possibilidade de alternar o conjunto *standby* e manutenção do mesmo enquanto os demais atendem as necessidades operacionais.

Os intervalos de todas as tarefas de manutenção e agrupamento das mesmas podem ser vistos no Apêndice H deste trabalho.

#### 4.8 ETAPA 7: REDAÇÃO DO MANUAL E IMPLEMENTAÇÃO

Algumas tarefas já estão sendo implementadas, tais como: a implementação de uma lógica semiautomática para controle das bombas à partir dos níveis de água na Torre de Resfriamento e no Poço de Carepas 2, a substituição dos relês de proteção elétrica (produção descontinuada e em final de vida útil), o nivelamento das bases civis das bombas com ajuda de ferramenta de levantamento 3D e a substituição das tubulações de água de arrefecimento.

A Figura 4.7 mostra o modelo do relê especificado para instalação no painel de alimentação em substituição aos atuais.

Figura 4. 7 – Relê de proteção especificado (SEL-751A)



Fonte: Selinc, 2017

A Fotografia 4.1 mostra um tubo retirado do sistema de água de arrefecimento. Pode-se notar o alto grau de entupimento, o que causava ineficiência e, algumas vezes, interrupção total do sistema de arrefecimento.

Fotografia 4.1 - Tubulação retirada do sistema de arrefecimento



Fonte: Autor, 2017

A Fotografia 4.2 mostra o reparo da base civil da P11 após nivelamento com utilização de ferramenta 3D. Possibilitando o correto nivelamento da base da bomba e evitando vibrações excessivas.

Fotografia 4. 2 – Base civil reparada



Fonte: Autor, 2017

Muitas tarefas de manutenção de rotina, tais como: inspeção, Termografia, etc. Foram mantidas, porém com intervalos ajustados para garantir a confiabilidade do sistema e a ausência de falhas entre as inspeções. Para os casos com curva P-F definidos, foi utilizado o intervalo em 50% desta curva.

Este trabalho será complementado ao longo do acompanhamento dos resultados e registro dos mesmos e será arquivado como um manual oficial de manutenção deste sistema.

#### 4.9 ETAPA 8: ACOMPANHAMENTO E REALIMENTAÇÃO

O acompanhamento da *performance* dos equipamentos será efetuado durante as reuniões semanais e registrados neste documento (além dos registros oficiais no Sistema Informatizado de Manutenção).

As definições feitas até o momento, neste trabalho, poderão ser atualizadas de acordo com os resultados obtidos e/ou análises futuras.

#### 4.10 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A implantação do RCM foi dividida em etapas, desde a preparação até o acompanhamento dos resultados e as correções que podem ser necessárias. Inicialmente foram checadas as condições atuais para implantação deste processo, tais como: apoio da estrutura gerencial, preparação da equipe, grau de motivação da equipe, etc. Posteriormente foi iniciado o levantamento da condição atual dos equipamentos, escolhido o subsistema a ser utilizado como piloto, realizado uma análise detalhada da *performance* deste subsistema, definido os modos de falha mais críticos e os planos de ação necessários e iniciado a implementação das melhorias propostas.

Este capítulo foi o mais importante do trabalho, pois trata a implantação prática das ferramentas estudadas no capítulo anterior em um processo real, detalhado no capítulo 2.

Nele pode-se acompanhar todo o processo de implantação do RCM, em todas as suas etapas. Traz informações para auxiliar na escolha do processo piloto e dos modos de falha que devem ter suas causas tratadas prioritariamente. Sempre levando em consideração a importância de cada componente/subsistema para o processo, sua *performance* atual e desejada e as dificuldades para implementação das tarefas de manutenção.

O próximo capítulo apresentará a conclusão deste trabalho e as considerações finais sobre o que foi tratado até o presente momento. Nele serão apontadas as dificuldades encontradas e, principalmente, os ganhos que já puderam ser percebidos, mesmo que nem todos possam ser mensurados.

## 5 CONCLUSÃO

A gestão dos ativos de uma empresa se torna, a cada dia, mais desafiadora pois têm se tornado um diferencial nos resultados operacionais das grandes empresas, podendo ser fator determinante na atratividade para expansão e/ou aquisições ou, até mesmo, decisivo na sobrevivência da mesma.

Neste cenário, a manutenção centrada em confiabilidade auxilia os setores responsáveis a otimizarem as atividades de manutenção das empresas, gerando melhor *performance* dos ativos e direcionando melhor os recursos alocados.

No desenvolvimento das primeiras etapas do RCM foram encontradas algumas dificuldades que tiveram que ser ultrapassadas e/ou ainda estão sendo tratadas, tais como:

- Mudança cultural da equipe (quebra de paradigmas);
- Nivelamento de informações e conhecimentos sobre a metodologia;
- Convergência de opiniões entre os integrantes da equipe;
- Histórico confiável e detalhado dos equipamentos;
- Disponibilidade dos integrantes da equipe;
- Concorrência com outras demandas gerenciais.

Estas barreiras foram contornadas com treinamentos externos e internos e demonstração de alguns casos de sucesso de outras aplicações. O histórico foi totalmente analisado e as informações passaram por um filtro para extrair as informações pertinentes e necessárias.

Foi acordada com a estrutura organizacional uma agenda para implementação da RCM, de forma a possibilitar a disponibilidade e um direcionamento das pessoas necessárias para focar nesta tarefa.

Apesar de a implementação do RCM ainda estar em sua fase inicial, já podem ser percebidos ganhos importantes. Tais como:

- Maior integração entre a equipe (manutenção elétrica, manutenção mecânica e operação);
- Maior controle operacional, gerando maior estabilidade no processo;

- A utilização otimizada dos ativos sendo vista como parte integrante do processo (práticas operacionais menos impactantes na vida útil dos componentes);
- Melhora significativa no registro de eventos, gerando histórico mais completo e confiável para futuras análises;
- Maior domínio técnico dos equipamentos do processo;
- Tendência de cumprimento do orçamento de 2017.

O desenvolvimento dos integrantes da equipe é bastante nítido, gerando maior conhecimento do processo e dos componentes envolvidos, maior controle e foco nas atividades pertinentes de cada função.

A RCM é dinâmica, pois as condições de processo e as necessidades operacionais podem mudar e, para manter a manutenção atualizada, esta deve ser analisada rotineiramente e, se necessário ser ajustada novamente a cada fator alterado no processo.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, é evidente o potencial de ganho que pode ser capturado com a continuação da implementação do RCM nos demais subsistemas da área do Condicionamento de Placas.

Como já havia sido comentado anteriormente, existem, inclusive, subsistemas bem similares ao que foi utilizado como piloto, o que otimizaria bastante a implantação.

Outros subsistemas também podem ser tratados, tais como o sistema de escarfagem e o sistema de corte em leitos, pois apesar de apresentarem resultados operacionais satisfatórios, demandam alto investimento em manutenção (potencial de economia de gastos).

Na área do Condicionamento também existem 18 pontes rolantes, várias delas com condições operacionais e de processo bastante similares, o que também tornaria um estudo bastante otimizado, pois várias ações de melhorias implementadas num possível sistema piloto poderiam ser aplicadas nas demais pontes de forma direta ou com pequenas adaptações.

## REFERÊNCIAS

BLOCKSIM, Versão 11. Tucson, AZ, USA, Relisoft Corporation, 2017.

MAZZEI, Denis. **Otimização da Confiabilidade de Sistemas - Notas de Aula.**

Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Curitiba, 2017

RELIASOFT. LDA. Disponível em: <<http://www.reliasoft.com.br/Weibull/index.htm>>.

Acesso em: 27 set. 2017.

RELIASOFT. RAM. Disponível em: <<http://www.reliasoft.com.br/rga/index.htm>>.

Acesso em: 29 set. 2017.

RIGONI, Emerson. **Ferramentas para Análise de Falhas - Notas de Aula.** Curso

de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Curitiba, 2017

RIGONI, Emerson. **Manutenção Centrada em Confiabilidade - Notas de Aula.**

Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Curitiba, 2017

SHIMURA, Sergio. **DOE - Delineamento de Experimentos - Notas de Aula.** Curso

de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Curitiba, 2017

SPANÓ, Claudio. **Crescimento da Confiabilidade - Notas de Aula.** Curso de

Especialização em Engenharia da Confiabilidade, Curitiba, 2017

WEIBULL ++, Versão 11. Tucson, AZ, USA, Relisoft Corporation, 2017.

## APÊNDICE A – ETAPA 0 DETALHADA

- ✓ Disponibilidade da Informação e/ou Recursos
  - Q1: Será adotado um procedimento de referência e/ou norma para implantação do RCM. A equipe de implantação conhece este procedimento/norma e todas as entradas/necessidades deste procedimento/norma estão disponíveis;
  - Q2: Existe uma documentação consistente das ações de manutenção. Exemplos: Ordens de Serviço consistentes, MTBF (Tempo Médio Entre Falhas), MTTR (Tempo Médio Para Reparo), histórico de falhas, etc.;
  - Q3: Os sistemas candidatos a implantação da MCC possuem uma documentação técnica adequada. Exemplos: Projetos, manuais, relatórios de ensaio, etc.;
  - Q4: O planejamento estratégico da empresa está documentado de forma auditável. Este planejamento contempla a manutenção e particularmente o RCM como estratégia para gestão de ativos.
- ✓ Condição e Desempenho Atual da Manutenção
  - Q1: O percentual de Inspeções Preditivas ou Manutenção Baseada na Condição é significativo quando comparado à Manutenção Preventiva Sistemática (baseada no tempo) ou Corretiva. Portanto, a equipe de manutenção tem experiência em Técnicas Preditivas e Manutenção Baseada na Condição;
  - Q2: O desempenho atual da manutenção é satisfatório e homogêneo em todo o sistema fabril, contando com uma equipe adequadamente preparada e eficaz para o desempenho de sua função;
  - Q3: Para o sistema, no qual se pretende implantar o RCM, historicamente o número de operadores, no chão de fábrica, é pequeno quando comparado a sistemas similares em outras plantas ou empresas;
  - Q4: Os custos diretos e indiretos devidos à manutenção são altos com o sistema atual de gestão da manutenção, quando comparados a outros sistemas similares em outras plantas ou empresas.

✓ Sistema Computacional de Suporte

- Q1: Para auxiliar a implantação do programa de RCM, um sistema computacional de automação de escritório (processamento de texto e planilhas eletrônicas) estará disponível, ou então, a equipe de implantação contará com um software específico para concepção do programa de RCM;
- Q2: A empresa dispõe de um sistema de gestão da informação integrado, que atende de forma satisfatória às necessidades do setor/equipe de manutenção. Este sistema estará disponível para a equipe de implantação e também para a gestão do programa de RCM após a sua implantação;
- Q3: A gestão da manutenção conta com um sistema computacional adequadamente dimensionado para o tamanho da empresa e do sistema que se quer implantar o RCM;
- Q4: O sistema computacional de gestão da manutenção é de uso amigável, toda a equipe possui treinamento adequado para utilizá-lo e sua utilização faz parte da rotina de trabalho da equipe de manutenção;
- Q5: O sistema computacional de gestão da manutenção permite integração com softwares específicos de implantação e gestão do RCM. Caso contrário, conta com no mínimo as seguintes funcionalidades: inclusão de novas tarefas com períodos customizados; controle estatístico da manutenção; e agrupamento de tarefas de manutenção de forma otimizada.

✓ Cultura da Manutenção e/ou Empresa

- Q1: O setor e/ou equipe de manutenção atual registra suas ações de forma suficientemente detalhada para suportar uma análise estatística de tais ações;
- Q2: A manutenção tem função estratégica dentro da empresa e ocupa um lugar de destaque na estrutura organizacional, assumindo um papel importante na gestão dos ativos físicos da empresa;
- Q3: A equipe e/ou setor de manutenção, em suas diferentes categorias profissionais, são motivados, cooperativos e conscientes de seu papel estratégico dentro de empresa;
- Q4: Outras metodologias de gestão da manutenção foram previamente adotadas e/ou estudadas e, por algum critério de consenso da empresa,

culminaram com a adoção do RCM. Portanto, é possível afirmar que a empresa e a equipe/setor de manutenção têm afinidade com métodos mais elaborados de gestão da manutenção;

- Q5: O atual programa de manutenção é continuamente atualizado e auditado por pessoal interno ou externo à empresa ou setor de manutenção.

✓ Gerenciamento Estratégico da Manutenção

- Q1: Existe um orçamento para viabilizar a implantação do RCM e que supra as seguintes necessidades: treinamento de pessoal dentro da filosofia do RCM, disponibilidade de recursos humanos, implantação de ações preditivas, e, implementação de sistemas computacionais de suporte ao RCM, caso necessário;
- Q2: As decisões referentes às estratégias de gestão da manutenção estão em conformidade e tem suporte por outros setores da empresa, o que caracteriza o bom relacionamento institucional;
- Q3: Os níveis gerenciais vêem a manutenção como investimento e não como um custo. Portanto, é possível afirmar que o RCM foi adotada como uma das estratégias para uma gestão mais eficaz dos ativos físicos;
- Q4: O RCM é visualizada como parte de um processo geral/global de gerenciamento da manutenção, com métodos e técnicas, podendo coexistir outras metodologias de gestão da manutenção em paralelo ou integradas ao RCM;

Q5: Grande parte da manutenção é terceirizada, entretanto, seus controles, registros e demais itens de gestão estão a cargo da empresa ou seu representante. Portanto, neste caso, não há problemas com a Gestão do Conhecimento inerente à manutenção.

CRITÉRIO	FATOR	O QUÊ	POR QUÊ	ONDE	QUANDO	QUEM	COMO
1	Q1	Definir a norma a ser seguida	Padronização e embasamento/espaldado técnico	Toda a empresa	Imediato	Equipe responsável pelas definições de metodologias de manutenção	Analisar normas existentes, definir a mais indicada e oficializar através de um padrão empresarial
		Treinar a equipe na norma escolhida	Padronização e embasamento/espaldado técnico	Toda a empresa	Imediato	Equipe responsável pelas definições de metodologias de manutenção	Criar cronograma de treinamento
	Q2	Criar rotina e, posteriormente, cultura de consulta a norma na fase de planejamento das atividades de manutenção	Padronização e embasamento/espaldado técnico	Toda a empresa	Imediato	Equipes de confiabilidade	Treinamento geral sobre a norma e coaching/feedback periodicamente
		Definir KPI's importantes	Possibilitar o acompanhamento do desempenho operacional dos ativos	Condicionamento de Placas	Até 30/11/17	Equipe de confiabilidade	Análise dos processos e demandas operacionais
2	Q1	Iniciar apuração e acompanhamento dos KPI's escolhidos	Possibilitar o acompanhamento do desempenho operacional dos ativos	Condicionamento de Placas	A partir de 01/01/18	Toda a equipe de manutenção	Gestão à vista durante o diálogo de performance diário
		Avaliar metodologia de manutenção mais indicada para cada item	Otimizar rotinas de manutenção	CRALAM	Até 29/06/18	Equipe responsável pelo RCM	Análise utilizando as Ferramentas de RCM definidas
	Q2	Aplicar RCM	Melhorar desempenho	CRALAM	Até 29/06/18	Equipe responsável pelo RCM	Análise utilizando as Ferramentas de RCM definidas
	Q4	Aplicar RCM	Reduzir custos	CRALAM	Até 29/06/18	Equipe responsável pelo RCM	Análise utilizando as Ferramentas de RCM definidas
4	Q1	Treinar equipes responsáveis pelos registros de ações de manutenção	Melhorar confiabilidade do histórico de manutenção	Condicionamento de Placas	Até 30/11/17	Equipe de confiabilidade	Treinamento formal, principalmente com equipes de manutenção corretilva
		Criar cultura de proatividade entre e funções	Melhorar rendimento das equipes de manutenção	Condicionamento de Placas	Até 30/11/17	Gerente e supervisores de manutenção	Diálogo e incentivo
		Acabar com cultura de cuidar apenas do seu serviço para evitar erros e punições	Melhorar rendimento das equipes de manutenção	Condicionamento de Placas	Até 30/11/17	Gerente e supervisores de manutenção	Diálogo e incentivo
4	Q3	Reforçar rotineiramente a confirmação de papéis e responsabilidades de todas as funções	Melhorar rendimento das equipes de manutenção	Condicionamento de Placas	Até 30/11/17	Supervisores	Nas reuniões diárias de diálogo de performance

## APÊNDICE B - ETAPA 1 DETALHADA

### 1. Equipe de Implantação (nome / cargo / dados de contato / etc...)

- Cezar R. Guedes/Especialista de Engenharia Eletrica /2736/cezar.guedes@arcelormittal.com.br
- Leonardo E. B. Simões/Especialista Confiabilidade/3452/leonardo.simoes@arcelormittal.com.br
- Quintino R. Sobrinho/Especialista Confiabilidade/2807/quintino.sobrinho@arcelormittal.com.br
- Josemar Astori/Assistente Tecnico Eletrica/2674/josemar.astori@arcelormittal.com.br
- Wesley Gomes Paradela/ Assistente Tecnico Mecanica/1714/wesley.paradela@arcelormittal.com.br
- Eliel Esteves Rocha/Planejador Eletrico/2803/eliel.rocha@arcelormittal.com.br
- Flavio Jose Conte/Planejador Mecanico/2826/flavio.conte@arcelormittal.com.br
- Jorge Antonio Zatta/Supervisor de Manutencao/2733/jorge.zatta@arcelormittal.com.br
- Wanderson Carcheno/Inspetor Eletrico/7352/wanderson.carcheno@arcelormittal.com.br
- Marcus Vinicius P. Guzzo/Inspetor Eletrico/7352/marcus.guzzo@arcelormittal.com.br
- Wilson L. T. dos Santos/Inspetor Mecanico/7352/wilson.santos@arcelormittal.com.br
- Vitor Areas/Especialista de Processo/2805/vitor.areas@arcelormittal.com.br

### 2. Patrocinador Interno (nome / cargo / dados de contato / etc...)

- Jose Carlos Pontes Junior/Gerente/1636/jose.pontes@arcelormittal.com.br

### 3. Facilitador (nome / cargo ou empresa / dados de contato / etc...)

- Leonardo Lira Alves/Gerente de Area Manutencao/1731/leonardo.alves@arcelormittal.com.br
- Elcimar da Silva Cunha/Gerente de Area Operacao/2853/elcimar.cunha@arcelormittal.com.br

### 4. Método e Estratégia de Implementação (justificar)

#### Método:

<input type="checkbox"/>	Método da Força Tarefa Treinada
<input type="checkbox"/>	Método Seletivo de Instalações Críticas
<input type="checkbox"/>	Método Abrangente de Instalações Simultâneas
<input checked="" type="checkbox"/>	Método do Projeto Piloto

#### Estratégia de Implementação:

<input type="checkbox"/>	Validação da Manutenção Existente
<input type="checkbox"/>	Exclusão de Modos de Falha Não Críticos
<input type="checkbox"/>	Análise Expedita por Analogia
<input checked="" type="checkbox"/>	Análise Expedita por Categoria
<input type="checkbox"/>	Base Zero

### 5. Sistemas Candidatos (justificar: pareto, GUT, perfil de perdas, etc...)

Para projeto piloto, deverá ser escolhido um subsistema pertencente ao Sistema de Recirculação de Água. Este sistema é fundamental para atendimento ao aumento da demanda de produção e vêm apresentando alto índice de falhas e, conseqüentemente, gastos com manutenção bem acima dos estimados nos orçamentos anuais.

### 6. Treinamento (necessidades e planejamento)

Será necessário treinamento para a equipe a fim de nivelar as informações e os conceitos de RCM para todos os integrantes. O treinamento será realizado internamente (instrutor próprio), uma vez que existem pessoas capacitadas para tal.

O treinamento ocorrerá antes do início das reuniões e terá duração de 8h (dividido em duas etapas de 4h).

7. Calendário de Reuniões (com anuência da equipe e chefias)

As reuniões ocorrerão semanalmente com duração de 2h.

8. Cronograma de Implantação (divulgar e solicitar anuência das chefias)

A implantação das melhorias propostas deverá ocorrer no ano de 2018. Salvo as melhorias já identificadas anteriormente e contempladas no orçamento de 2017.

9. Previsão Orçamentária (desenvolvimento, implementação e execução)

A previsão orçamentada será feita individualmente (a cada melhoria proposta), de acordo com a identificação e determinação/planejamento das mesmas.

10. Observações

Sem observações até o momento.

## APÊNDICE C – DELINEAMENTO OPERACIONAL

Para o estudo em questão, a abordagem utilizada será através da aplicação do Delineamento Fatorial de Dois Níveis e três fatores, com um numero total de execuções requeridas de  $2^3$ .

O experimento tem com objetivo investigar fatores que afetam a temperatura de saída das placas do resfriador. Os fatores principais investigados são:

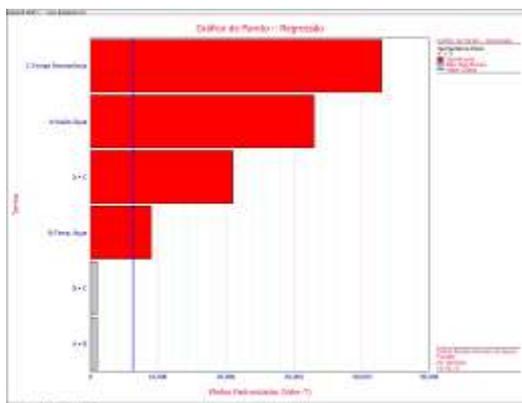
- 1) Vazão de entrada de água do resfriador: este fator é controlado pelo número de bombas em operação, podendo ter de uma ou duas operando num total de três. A vazão é medida diretamente no medidor de vazão da linha de saída das três bombas. O impacto maior deste fator no processo é no consumo de água do processo em decorrência do aumento de água para o resfriador e aumento de perda por evaporação, conseqüentemente sendo necessário o aumento do consumo do suprimento de água de make up, para manter o nível do sistema estável.
  - a. Min= 4.000 m<sup>3</sup>/h
  - b. Max= 5.500 m<sup>3</sup>/h
- 2) Temperatura da água de entrada: este fator está ligado a temperatura de saída da água após as torres de resfriamento, onde pode-se ter de 1 a 4 torres operando para redução da temperatura da água. O impacto e a consequência da variação do número de torres em operação é o consumo de energia elétrica pelos motores das torres e perda de água também por evaporação.
  - a. Min= 45 °C
  - b. Max= 55 °C
- 3) Tempo de permanência da placa no interior do resfriador: é o fator mais critico pois influencia na produtividade da linha.
  - a. Min= 15 min
  - b. Max= 25 min

Como a investigação quer identificar as interações entre os fatores, será utilizado o delineamento fatorial completo e por limitações de coleta de dados no campo e para simplificar o experimento será utilizada apenas uma replicação.

Fatores				
	A	B	C	Resposta
Ordem	Vazão de água (m <sup>3</sup> /h)	Temp. água (°C)	Tempo Permanência (min)	Temp. Placa (°C)
1	5500	55	25	56
2	5500	55	15	67
3	5500	45	25	51
4	5500	45	15	62
5	4500	55	25	61
6	4500	55	15	94
7	4500	45	25	58
8	4500	45	15	89

Espera-se determinar o ponto ótimo de operação, entre os 3 fatores, para garantir maior produtividade possível, ou seja, com o menor tempo de permanência da placa no resfriador, com o mínimo de utilização de água, e com temperatura de saída de placas mais próxima do admissível para o escafador.

RESULTADOS:



Equação (Valores reais)	
Temperatura Placa =	
	395,250000
-0,063500	A: Vazão Água
+0,150000	B: Temp. Água
-12,150000	C: Tempo Permanência
+0,000100	A * B
+0,002100	A * C
-0,010000	B * C

1. Cenário A – Favorável à produção: minimizando o tempo de permanência:

					Resposta
Bombas água	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Ventiladores	Temp. Água (°C)	Tempo Permanência (min)	Temp. Placa (°C)
2	5500	3	45	8	70

2. Cenário B – Favorável ao consumo de recursos: economia de água e energia, quando o ritmo de produção for favorável de produção para isso:

					Resposta
Bombas água	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Ventiladores	Temp. Água (°C)	Tempo Permanência (min)	Temp. Placa (°C)
1	4500	3	45	21	70

3. Cenário C – Intermediário: considerando o ritmo de produção atual e com certa economia de recursos. Restrição de vazão nas válvulas de saída das bombas:

					Resposta
Bombas água	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Ventiladores	Temp. Água (°C)	Tempo Permanência (min)	Temp. Placa (°C)
2	5200	3	45	15	70

## APÊNDICE D - ETAPA 2 DETALHADA

### 1) Seleção do Sistema

1.1) Método utilizados para Seleção do Sistema (pareto, GUT, perfil de perdas, etc...)

Para seleção do sistema foi analisado todo o histórico de falhas no sistema, bem como os custos de manutenção. Também foram avaliados qualitativamente todos os equipamentos, do ponto de vista de importância e impacto no processo.

1.2) Critérios utilizados para Seleção do Sistema (critérios utilizados no método 1.1)

Equipamentos com maior número de ocorrências, com maior custo de manutenção e com maior impacto no processo.

1.3) Resultados obtidos para a Seleção do Sistema (sistema escolhido - justificativa)

Em função do Pareto abaixo, foi evidenciado que as bombas do Poço de Carepas apresentam o maior número de ocorrências. Como o custo de manutenção é diretamente ligado ao número de falhas e uma vez que as bombas desta localização são essenciais ao processo. Foi definido que as bombas P4, P5, P6, P11, P12 e P13 seriam estudadas como projeto piloto.

### 2) Coleta de Informações

2.1) Documentação do Sistema (listar, identificar e anexar ao manual da MCC)

B5193QX01001 – QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO PRINCIPAL DE ENERGIA – WT 13,2 KV, WT 3,3 KV E PCW 1.

B5193JX01051 – CENTRO DE COMANDO DE MOTORES – MCC W1

B5156GRT0001 – BALANÇO DE MASSA NO CRALAM

B5193JET0003 – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS MOTORES DAS BOMBAS P16, P17 E P18

B5193JX00039 – DIAGRAMA FUNCIONAL DO PAINEL DE ACIONAMENTO DOS FILTROS AUTOLIMPANTES

B5193MX00108 – BOMBA VERTICAL P16, P17 E P18: COLUNA SUPERIOR

B5193MX00112 – BOMBA VERTICAL P16, P17 E P18: COLUNA INFERIOR

B5193MX00116 – BOMBA VERTICAL PC3, PC4 E PC5: COLUNA INFERIOR

B5193MX00117 – BOMBA VERTICAL PC3, PC4 E PC5: COLUNA SUPERIOR

B5152MX00059 – BOMBA VERTICAL P11, P12 E P13: EIXO INFERIOR

B5193TX00024 – TUBULAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO DO TANQUE DE SEJAGEM: PLANTA

B5193TX01006 – TUBULAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO ÁREA 1: VISTA SUPERIOR

B5193TX01007 – TUBULAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO ÁREA 2: VISTA SUPERIOR

B5193TX01008 – TUBULAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO ÁREA 3: VISTA SUPERIOR

B5193TX01009 – TUBULAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO ÁREA 4: VISTA SUPERIOR

B5193TX01010 – TUBULAÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO ÁREA 5: VISTA SUPERIOR

B5193TX06036 – INSTALAÇÃO DAS BOMBAS P4, P5 E P6: DETALHES E CORTES

2.2) Especificação do Contexto Operacional (Produtividade, Padrões de Qualidade, Estratégia (contínuo/batelada), Disponibilidade, Segurança, Meio Ambiente, Ciclo Operacional, Redundâncias, Política de Sobressalentes, etc....)

Já detalhado no Capítulo 2 deste trabalho.

2.3) Definição das Fronteiras do Sistema (fotos/desenhos + descrição textual + tabela)

Sistema	CRALAM			Id_Sistema	1
Id_Subistema	Subsistema	Id_Função	Função	Id_Componente	Componente
1	Bombas de 450 kW	1	Retornar água do PC2 para a Torre de Resfriamento	1	Conjunto Motor/Bomba P11
				2	Conjunto Motor/Bomba P12
				3	Conjunto Motor/Bomba P13
2	Bombas de 160 kW	1	Retornar água do PC2 para a Torre de Resfriamento	4	Conjunto Motor/Bomba P4
				5	Conjunto Motor/Bomba P5
				6	Conjunto Motor/Bomba P6

Serão estudados os dois subsistemas (conjuntos motor/bomba) e seus periféricos que impactam diretamente no funcionamento dos mesmos. Tais como: sistema de água de selagem, sistema de filtragem, sistema de acionamento, etc.

RESULTADOS DO LDA:

P11

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório	Resultados da RDA Paramétrica
Informações do Usuário	
Nome	n11029 n11029
Empresa	
Data	09/10/2017
Entrada do Usuário	
Função IF	IPL
Parâmetros	
Beta	1,456547
Lambda	0,001029
q	0
Valor da LK	-477,012507
Beta(W)	1,456547
Eta(W)	112,508205
FR	1
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var Beta=0,009872	Cov Lambda Beta=-0,000052
Cov Lambda Beta=-0,000052	Var Lambda=2,852388E-07

P12

<b>Relatório de Resultados Simplificado</b>	
Tipo de Relatório	Resultados da RDA Paramétrica
<b>Informações do Usuário</b>	
Nome	n11029 n11029
Empresa	
Data	09/10/2017
<b>Entrada do Usuário</b>	
Função IF	IPL
<b>Parâmetros</b>	
Beta	1,327608
Lambda	0,062932
q	0
Valor da LK	-145,97202
Beta(W)	1,327608
Eta(W)	8,030313
FR	1
<b>LOCAL VAR/ COV MATRIX</b>	
Var Beta=0,017365	Cov Lambda Beta=-0,002701
Cov Lambda Beta=-0,002701	Var Lambda=0,000499

P13

<b>Relatório de Resultados Simplificado</b>	
Tipo de Relatório	Resultados da RDA Paramétrica
<b>Informações do Usuário</b>	
Nome	n11029 n11029
Empresa	
Data	09/10/2017
<b>Entrada do Usuário</b>	
Função IF	IPL
<b>Parâmetros</b>	
Beta	1,604786
Lambda	0,011345
q	0
Valor da LK	-52,659589
Beta(W)	1,604786
Eta(W)	16,297254
FR	1
<b>LOCAL VAR/ COV MATRIX</b>	
Var Beta=0,092635	Cov Lambda Beta=-0,003253
Cov Lambda Beta=-0,003253	Var Lambda=0,000123

P4

<b>Relatório de Resultados Simplificado</b>	
Tipo de Relatório	Resultados da RDA Paramétrica
<b>Informações do Usuário</b>	
Nome	n11029 n11029
Empresa	
Data	09/10/2017
<b>Entrada do Usuário</b>	
Função IF	IPL
<b>Parâmetros</b>	
Beta	1,934528
Lambda	0,006424
q	0
Valor da LK	-32,123239
Beta(W)	1,934528
Eta(W)	13,588647
FR	1
<b>LOCAL VAR/ COV MATRIX</b>	
Var Beta=0,215202	Cov Lambda Beta=-0,003933
Cov Lambda Beta=-0,003933	Var Lambda=0,000076

P5

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório	Resultados da RDA Paramétrica
Informações do Usuário	
Nome	n11029 n11029
Empresa	
Data	09/10/2017
Entrada do Usuário	
Função IF	IPL
Parâmetros	
Beta	1,209545
Lambda	0,079406
q	0
Valor da LK	-107,895543
Beta(W)	1,209545
Eta(W)	8,119951
FR	1
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var Beta=0,023074	Cov Lambda Beta=-0,004539
Cov Lambda Beta=-0,004539	Var Lambda=0,001068

P6

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório	Resultados da RDA Paramétrica
Informações do Usuário	
Nome	n11029 n11029
Empresa	
Data	09/10/2017
Entrada do Usuário	
Função IF	IPL
Parâmetros	
Beta	1,540892
Lambda	0,026229
q	0
Valor da LK	-59,556352
Beta(W)	1,540892
Eta(W)	10,62105
FR	1
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var Beta=0,082267	Cov Lambda Beta=-0,005685
Cov Lambda Beta=-0,005685	Var Lambda=0,000429

RESULTADO DA ANÁLISE DE ALOCAÇÃO:

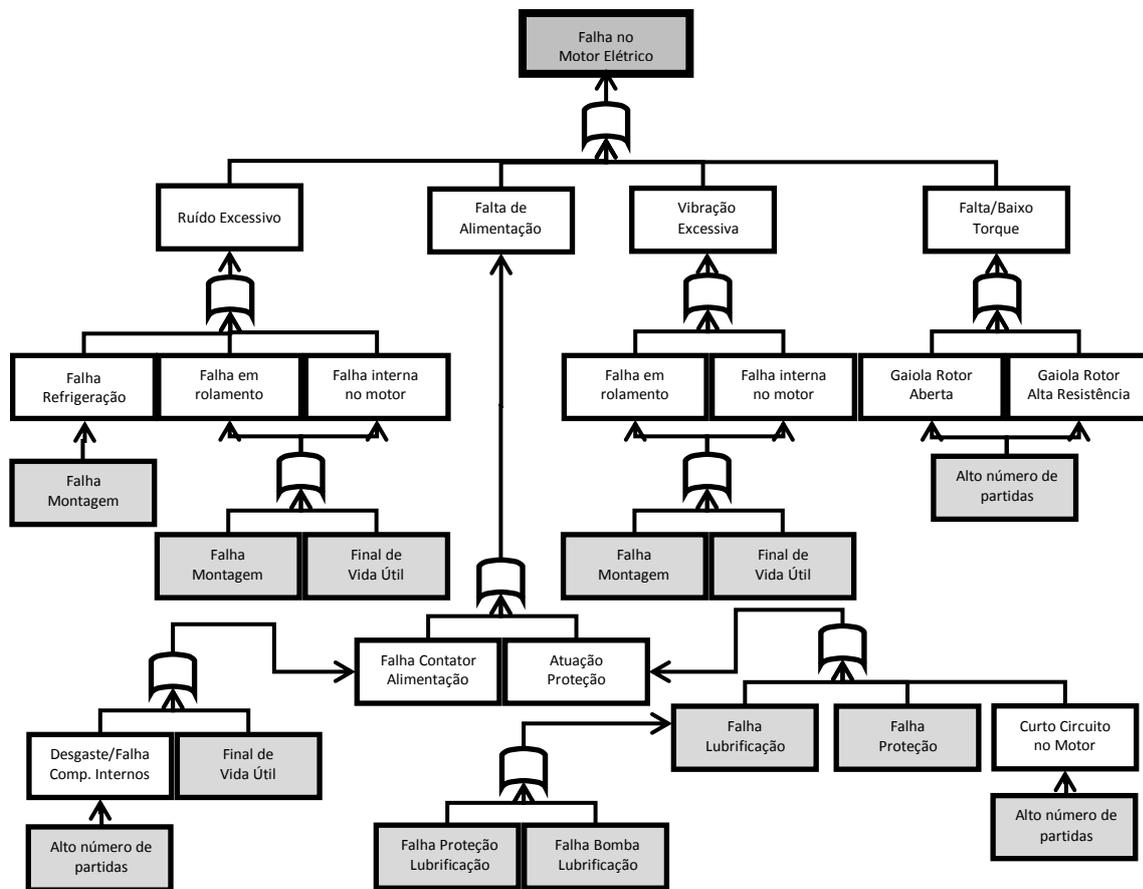
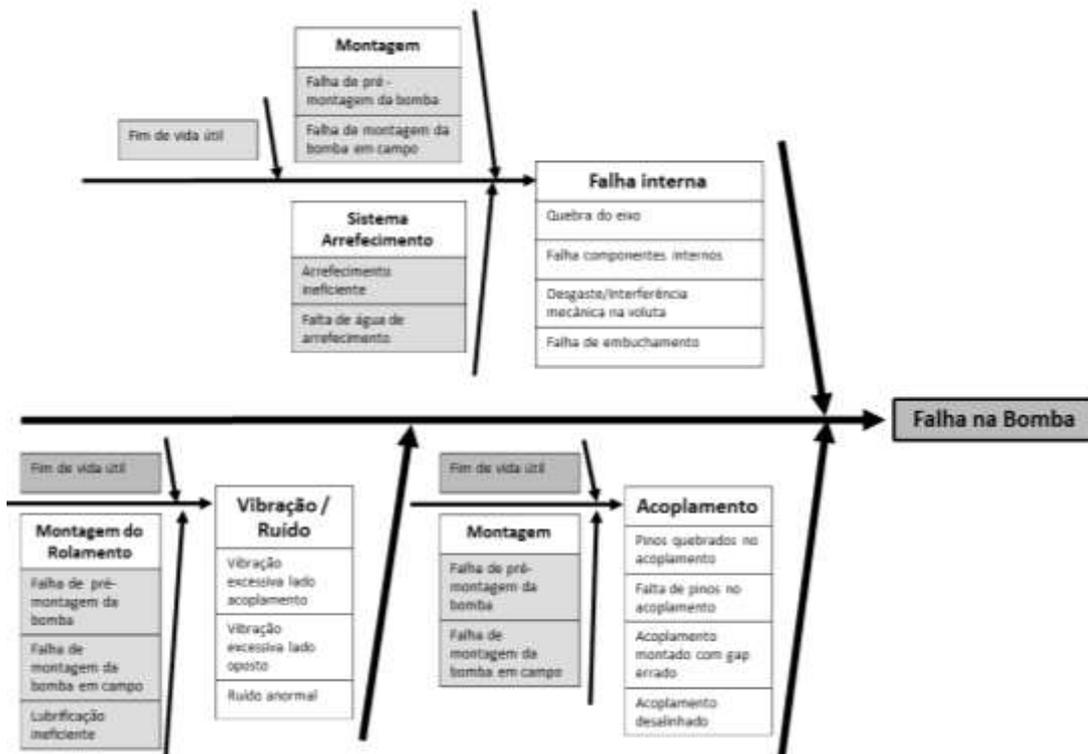
Nome de Ação	Importância de Contribuição	Contribuição Atual	Contribuição Máxima Admissível	Habilidades	Contribuição Alvo	Imposição em Percento
F10	0,38296	0,38296	1	Proteção (A)	0,38296	1,17827
F11	0,39505	0,39505	1	Proteção (B)	0,39505	1,20517
F12	0,00889	0,00889	1	Def (D)	0,00889	1,02213
F4	0,11960	0,07268	1	F80 (E)	0,04290	1,49878
F5	0,26252	0,39455	1	F80 (G)	0,00924	1,47078
F6	0,23588	0,00279	1	F80 (G)	0,61187	1,15204
F102	0,00000	1,00000	90	Não		

## APÊNDICE E – ETAPA 3 DETALHADA

Id_Função	Função	Id_Falha_Funciona	Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Modo de Falha	Efeito				Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência (O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S.O.D)
						Local	Sistema	Planta							
1	Bombear água do PC2 para a Torre de Resfriamento a uma vazão acima de 4000 m <sup>3</sup> /h por bomba (P11/P12/P13) ou acima de 2500 m <sup>3</sup> /h (P4/P5/P6)	1.1	Não bombear água	1.1.1	Motor elétrico em falha	Sem efeito	Aumento no nível de água do PC2 e redução do nível de água da Torre de Resfriamento	Possível parada operacional por falta de água na Torre de Resfriamento		10	Falta de alimentação no painel geral (WT 3,3 kV)	1	- Inspeção sensitiva no painel alimentador - Manutenção preventiva no painel alimentador - Existe redundância de alimentações	5	50
										10	Curto circuito entre espiras do enrolamento do motor	3	- Inspeção preditiva realizada por equipe especializada - Medição de isolamento durante manutenções preventivas	10	300
										10	Curto circuito do enrolamento do motor para terra	5	- Inspeção preditiva realizada por equipe especializada - Medição de isolamento durante manutenções preventivas	5	250
										10	Gaiola de esquilo do motor aberta	5	Não existe	7	350
										5	Contator de alimentação avariado	7	- Inspeção sensitiva - Manutenção preventiva com empresa especializada	5	175
										5	Sistema de proteção elétrica atuando indevidamente	8	- Inspeção sensitiva - Calibração periódica com equipe especializada	7	280
										10	Cabo de força avariado	1	Não existe	10	100
										3	Proteção de água de arrefecimento atuada	10	- Inspeção sensitiva	3	90
										1	Proteção de água de arrefecimento atuando indevidamente	7	Não existe	10	70

Id_Função	Função	Id_Falha_Funciona	Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Modo de Falha	Efeito			Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência (O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S.O.D)
						Local	Sistema	Planta						
1	Bombear água do PC2 para a Torre de Resfriamento a uma vazão acima de 4000 m3/h por bomba (P11/P12/P13) ou acima de 2500 m3/h (P4/P5/P6)	1.1	Não bombear água	1.1.3	Bomba em falha	Sem efeito	Aumento no nível de água do PC2 e redução do nível de água da Torre de Resfriamento	Possível parada operacional por falta de água na Torre de Resfriamento	10	Acoplamento desalinhado	5	- Acompanhamento de montagem	3	150
									7	Vibração excessiva em rolamento	8	- Inspeção sensível - Análise de vibração preditiva	3	168
									7	Falha de embuchamento	5	- Inspeção sensível - Análise de vibração preditiva	5	175
									7	Desgaste/Interferência mecânica na voluta da bomba	5	- Inspeção sensível - Análise de vibração preditiva	3	105
									8	Falha em componentes internos da bomba	10	- Inspeção sensível - Análise de vibração preditiva	5	400
									10	Quebra do eixo da bomba	1	- Inspeção sensível - Análise de vibração preditiva	5	50
									5	Falta de pinos no acoplamento	5	- Inspeção sensível	1	25
									5	Pinos quebrados no acoplamento	5	- Inspeção sensível	1	25
									5	Ruído anormal	8	- Inspeção sensível	1	40
									10	Acoplamento montado com gap errado	10	- Acompanhamento de montagem	3	300

Id_Função	Função	Id_Falha_Funciona	Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Modo de Falha	Efeito				Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência (O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S.O.D)
						Local	Sistema	Planta							
1	Bombear água do PC2 para a Torre de Resfriamento a uma vazão acima de 4000 m3/h por bomba (P11/P12/P13) ou acima de 2500 m3/h (P4/P5/P6)	1.2	Bombear água com vazão abaixo de 4000 m3/h (P11/P12/P13) ou abaixo de 2500 m3/h (P4/P5/P6)	1.2.1	Motor elétrico com baixo torque	Sem efeito	Aumento no nível de água do PC2 e redução do nível de água da Torre de Resfriamento	Possível parada operacional por falta de água na Torre de Resfriamento	10	Galão de esquilho do motor com resistência alta	5	Não existe	7	350	
															1.2.2
								7	Desgaste/Interferência mecânica na voluta da bomba	5	- Inspeção sensível - Análise de vibração preditiva	3	105		
								7	Falha de embuchamento	5	- Inspeção sensível - Análise de vibração preditiva	5	175		



## APÊNDICE F - ETAPA 4 DETALHADA

Id_Função	Id_Falha_Funcional	Id_Modo de Falha	<b>Modo de Falha</b>	<b>A Falha Funcional ou o Efeito do Modo de Falha é Evidente?</b>	<b>A Falha Funcional ou o Efeito do Modo de Falha afeta a Segurança e/ou o Meio Ambiente?</b>	<b>A Falha Funcional ou o Efeito do Modo de Falha tem consequências Econômicas e/ou Operacionais?</b>	<b>Categoria</b> ESA – Evidente Segurança Ambiente EEO – Evidente Económico Operacional OSA – Oculto Segurança Ambiente OEO – Oculto Económico Operacional
1	1.1	1.1.1	Motor elétrico em falha	Sim	Não	Sim	EEO
	1.1	1.1.2	Bomba em falha	Sim	Não	Sim	EEO
		1.2.1	Motor elétrico com baixo torque	Sim	Não	Sim	EEO
1	1.2	1.2.2	Bomba com baixo rendimento	Sim	Não	Sim	EEO





## APÊNDICE H - ETAPA 6 DETALHADA

Id_Função	Id_Falha_Funcional	Id_Modo de Falha	Id_Tarefa	Descrição da Tarefa Proposta	Intervalo Inicial	Agrupamento da Tarefa	Equipe Responsável
1	11	11.1 e 12.1	11.1.1	- Inspeção e testes preditivos no motor por equipe especializada	1 ANO	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO PREDITIVA
			11.1.2	- Substituição do motor por sobressalente, baseado na condição (com base nas tarefas de inspeção)	-	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.3	- Inspeção visual das condições do motor	28 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.4	- Termografia do motor	56 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.5	- Acompanhamento da corrente de trabalho	56 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.6	- Implementação de uma lógica de controle/acionamento dos motores/bombas semiautomática	---	EM ROTINA	EQUIPE DE ENGENHARIA
			11.1.7	- Inspeção, diagnóstico e testes preditivos no contator por empresa especializada	2 ANOS	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EMPRESA ESPECIALIZADA (CONTRATO EXTERNO)
			11.1.8	- Substituição dos componentes do painel, baseado na condição (com base nas tarefas de inspeção)	---	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.9	- Substituição dos componentes do sistema de água de arrefecimento, baseado na condição (com base nas tarefas de inspeção)	---	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.10	- Inspeção visual das condições do painel	28 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.11	- Termografia do sistema de alimentação	56 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.12	- Inspeção visual das condições do sistema de água de lubrificação	14 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.13	- Testes periódicos no sistema de proteção de água de lubrificação	14 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			11.1.14	- Substituição dos componentes do sistema de proteção elétrica (relés de proteção). Os mesmos já se encontram obsoletos e em final de vida útil.	---	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EQUIPE DE ENGENHARIA / EQUIPE ESPECIALIZADA DE PROTEÇÃO/UTILIDADES

Id_Função	Id_Falha Funcional	Id_Modo de Falha	Id_Tarefa	Descrição da Tarefa Proposta	Intervalo Inicial	Agrupamento da Tarefa	Equipe Responsável
1	1.2	1.1.2 e 1.2.2	1.1.1.1	- Inspeção e testes preditivos na bomba por equipe especializada	1 ANO	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO PREDITIVA
			1.1.1.2	- Substituição da bomba por sobressalente, baseado na condição (com base nas tarefas de inspeção)	-	EM CONJUNTO COM PARADAS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			1.1.1.3	- Inspeção visual das condições da bomba	28 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			1.1.1.4	- Termografia da bomba	56 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			1.1.2	- Criar padrão de montagem de acoplamento (definição de ajuste de gap padronizado)	-	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA / EQUIPE DE ENGENHARIA
			1.1.2	- Inspeção visual das condições do sistema de água de arrefecimento	14 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			1.1.1.7	- Testes periódicos no sistema de proteção de água de arrefecimento	14 DIAS	EM ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			1.1.1.8	- Instalação de sistema de monitoração online de vibração	-	QUANDO A BOMBA FOR RETIRADA PARA REPARO	EQUIPE DE ENGENHARIA / EQUIPE ESPECIALIZADA DE VIBRAÇÃO/EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA
			1.1.1.9	Manutenir bases civis das bombas para melhorar encaixe dos conjuntos na base	-	ROTINA	EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE ROTINA/EQUIPE ESPECIALIZADA EM MEDIÇÃO 3D