

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

MARCELO LUIZ AFONSO DA CUNHA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE DE
PLACAS DE AÇO DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**VITÓRIA
2019**

MARCELO LUIZ AFONSO DA CUNHA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE DE
PLACAS DE AÇO DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

VITÓRIA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE DE PLACAS DE AÇO DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE

por

MARCELO LUIZ AFONSO DA CUNHA

Esta monografia foi apresentada em 04 de outubro de 2019, 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. Marcelo Rodrigues Dr.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Wanderson Stael Paris, MSc.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Dedico este trabalho à minha esposa Danielly e filha Emanuely pelo tempo ausente durante a dedicação deste período e trabalho.

“Para cada problema de haver um método para resolvê-lo sistematicamente; parte por parte”.
(Descartes, 1638)

RESUMO

CUNHA, Marcelo Luiz Afonso. **Análise de confiabilidade de um sistema de transporte (Mesa de Enfornamento) de placas de aço do Laminador de Tiras a Quente**. 2019. 88 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O trabalho apresenta o modelamento do sistema de transporte das placas de aço denominada mesa de enfornamento dos fornos em um Laminador de Tiras a Quente. Buscando a obtenção de dados quantitativos de confiabilidade e análise de melhorias e modificações nos componentes com o objetivo de aumento da confiabilidade e disponibilidade do sistema.

A escolha da mesa de enfornamento para desenvolvimento do trabalho pelo potencial de impacto na produtividade do laminador, e também o mesmo possui, uma quantidade de componentes iguais trabalhando em série. Permitindo por meio de uma análise concentrada dos subsistemas, denominado unidade de acionamento, o modelamento de todo o sistema de resfriamento laminar. Para o desenvolvimento do trabalho será utilizado a metodologia da engenharia da confiabilidade, ferramentas de software específicas para tratamento de dados históricos de falhas dos subsistemas e análise de problemas existentes neste sistema.

Após a análise quantitativa de confiabilidade são propostas melhorias com foco na redução e ou eliminação dos principais modos de falhas identificados, buscando otimização dos recursos e custos envolvidos na manutenibilidade do sistema.

Palavras-chave: Transporte. Placas de aço. Laminação a Quente. Manutenção Centrada na Confiabilidade. Siderurgia.

ABSTRACT

Cunha, Marcelo Luiz Afonso da. **Reliability analysis of a transport system (Tables Entry to Furnace) the slab steel the Hot Strip Mill.** 2019. 88 pages. Monograph (Specialization in Reliability Engineering) - Federal Technical University of Paraná. Curitiba, 2017.

The work presents the modeling of the system of transport of the steel plates denominated table of setting of the furnaces in a of Hot Strips. Seeking to obtain quantitative data of reliability and analysis of improvements and modifications in the components with the objective of increasing the reliability and availability of the system.

The choice of the milling table for the development of the work for the potential impact on the productivity of the mill, and also the same, has a number of equal components working in series. It allows the modeling of the whole laminar cooling system through a concentrated analysis of the subsystems, called the drive unit.

For the development of the work will be used to the reliability engineering methodology, specific software tools to treat historical data of subsystem failures and analyze problems in this system.

After the quantitative reliability analysis, improvements will be proposed with a focus on the reduction and / or elimination of the main identified failure modes, seeking optimization of the resources and costs involved in maintaining the system.

Keywords: Transport. Steel Slab. Hot rolling. Reliability-Centered Maintenance. Steelmaking.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Módulos do Sistema SAP	15
Figura 1.2 - Interdependência entre o SAP – PM e outros módulos	16
Figura 1.3 - Modelo de manutenção definido para a ArcelorMittal	17
Figura 2.1 - Foto da área do ArcelorMittal Tubarão e suas áreas operacionais	25
Figura 2.2 - Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão	26
Figura 2.3 - Layout geral do Laminador de Tiras a Quente	27
Figura 2.4 - Vista aérea do pátio de placas	29
Figura 2.5 - Carregamento de placas nos fornos	30
Figura 2.6 - Funcionamento dos <i>Walking beans</i> do Forno de Reaquecimento	30
Figura 2.7 - Descarregamento do Forno de Reaquecimento	31
Figura 2.8 - Laminador Vertical e laminador Desbastador	32
Figura 2.9 - Funcionamento esquemático do laminador desbastador	33
Figura 2.10 - Coilbox	34
Figura 2.11 - Detalhes de diferentes tipos de pontas de esboço após laminação	35
Figura 2.12 - Detalhe de uma cadeira de um Trem Acabador	36
Figura 2.13 - Vista geral de um sistema de resfriamento de bobinas	37
Figura 2.14 - Vista frontal de uma bobinadeira em operação	39
Figura 3.1 - Curva da Banheira	43
Figura 3.2 - Padrões de Falha	43
Figura 3.3 - Efeito do parâmetro β na distribuição de dados de vida	48
Figura 3.4 - Tela de exemplo do diagrama de blocos (RBD)	50
Figura 4.1 - Fluxo de aquisição de dados históricos.	54
Figura 4.2 - Diagrama de blocos de confiabilidade da unidade de acionamento.	58
Figura 4.3 - Gráficos de contorno para motores elétricos.	60
Figura 4.4 - Curva Confiabilidade x Tempo para motores da mesa de recebimento.	62
Figura 4.5 - Função Densidade de Probabilidade de motores da mesa de recebimento	62
Figura 4.6 - Projeto de construção do conjunto do rolo e mancais.	623
Figura 4.7 - Curva Confiabilidade x Tempo para acoplamentos da mesa de recebimento	65
Figura 4.8 - Função Densidade de Probabilidade dos acoplamentos da mesa de recebimento	65
Figura 4.9 - Curva Confiabilidade x Tempo para motoredutores da mesa de recebimento	657
Figura 4.10 - Função Densidade de Probabilidade dos motoredutores	67
Figura 4.11 - Curva Confiabilidade x Tempo para unidade de acionamento da mesa de recebimento	69
Figura 4.12 - Importância da confiabilidade para a unidade de acionamento.	70
Figura 4.13 - Diagrama de blocos de confiabilidade so sistema de acionamento.	71

Figura 4.14 - Curva Confiabilidade x Tempo para o sistema de recebimento.....	72
Figura 4.15 - Distribuição de falha por modo de falha.....	73
Figura 4.16 - Posição de montagem do motoredutor	75
Figura 4.17 - Controle de nível do óleo do motoredutor.....	78
Figura 4.18 - Novo modelo de acoplamento flexível.	79
Figura 4.19 - Nível de estoque médio de motores da mesa de recebimento.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Perdas de produção e financeiras por ano na área do pátio de placas atribuída as especialidades mecânica e elétrica	577
Tabela 4.2 - Perdas de produção e financeiras por ano na mesa de recebimento atribuída as especialidades mecânica e elétrica	597
Tabela 4.3 - Dados técnicos dos motores.	59
Tabela 4.4 - Parâmetros de confiabilidade do sistema de recebimento de placas....	61
Tabela 4.5 - Parâmetros de confiabilidade dos acoplamentos da mesa de recebimento.....	664
Tabela 4.6 - Parâmetros de confiabilidade dos redutores.	66
Tabela 5.1 - Memorial de cálculo dos ganhos esperados.	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA DA PESQUISA	14
1.2	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo Geral.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	JUSTIFICATIVA	19
1.5	METODOLOGIA DE PESQUISA APLICADA.....	20
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	ÁREA DE APLICAÇÃO	23
2.1	ARCELORMITTAL TUBARÃO	23
2.2	O LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE.....	26
2.2.1	Pátio de Placas.....	28
2.2.2	Fornos de Reaquecimento de Placas.....	29
2.2.3	Laminador Desbastador	31
2.2.4	Coilbox	33
2.2.5	Tesoura de Pontas	34
2.2.6	Trem Acabador.....	35
2.2.7	Mesa de Resfriamento	36
2.2.8	Bobinadeiras	38
2.2.9	Conveyor	39
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	40
3	CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE	41
3.1	CONFIABILIDADE.....	41
3.2	CONCEITO DE FALHA	42
3.2.1	Falha Funcional.....	42
3.2.2	Mecanismo de Falha	42
3.2.3	Modo de Falha.....	44
3.3	CONCEITOS DE DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE	45
3.3.1	Disponibilidade	45
3.3.2	Mantenabilidade	46
3.3.3	Importância da Confiabilidade no Tempo	46
3.4	CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE WEIBULL	47
3.5	METODOLOGIA DO DIAGRAMA DE BLOCOS - RBD.....	49
3.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	51
4	DESENVOLVIMENTO	52
4.1	PREMISSAS PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	52
4.2	AQUISIÇÃO DE DADOS HISTÓRICOS DE FALHAS.....	53
4.2.1	SAP (ERP)	54
4.2.2	AP – Acompanhamento da Produção do LTQ	55

4.2.3	SGT – Sistema de Gestão de Turno	56
4.3	RESULTADOS HISTÓRICOS OBTIDOS	56
4.4	MODELAMENTO DO SISTEMA	58
4.4.1	Falha em motores elétricos	59
4.4.2	Falha em rolos e mancais	63
4.4.3	Falha em acoplamentos	64
4.4.4	Falha em motoredutores	66
4.5	SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA	68
4.5.1	Configuração do contexto operacional	68
4.5.2	Modelamento e simulação da unidade de acionamento.....	69
4.5.3	Modelamento e simulação da unidade de acionamento.....	71
4.6	AVALIAÇÃO DOS MODOS DE FALHA	73
4.6.1	Motor com baixo isolamento.....	74
4.6.1.1	Proposta para eliminação da causa: acúmulo de óleo	745
4.6.2	Afrouxamento dos parafusos de fixação	757
4.6.2.1	Proposta para eliminação da causa	797
4.6.3	Travamento do redutor	757
4.6.3.1	Proposta para eliminação da causa	798
4.6.4	Quebra do acoplamento	758
4.6.4.1	Proposta para eliminação da causa	79
4.7	DIMENSIONAMENTO DE ESTOQUE	80
4.8	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	81
5	CONCLUSÃO	82
5.1	AQUISIÇÃO DE DADOS	82
5.2	CULTURA DA CONFIABILIDADE.....	83
5.3	IMPLANTAÇÃO DAS MELHORIAS NOS EQUIPAMENTOS.....	83
5.4	RESULTADOS	84
	REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

Com a chegada da economia globalizada, observou-se um aumento na competitividade por produtos e sistemas de melhores desempenhos a custos cada vez mais competitivos. Assim mais do que nunca surge à necessidade de redução na probabilidade de falhas nas linhas produção e dos respectivos produtos (sejam falhas que simplesmente aumentam os custos associados aos produtos ou falhas que possam implicar riscos sérios à segurança pública), o que direcionou uma ênfase crescente em na confiabilidade dos ativos de um processo produtivo. O conhecimento formal resultante da análise de falhas e da mitigação de sua ocorrência provê uma rica variedade de contextos nos quais surgem considerações acerca da confiabilidade. (FOGLIATTO; DUARTE, 2009).

No atual cenário econômico mundial, o qual impõe um alto grau de competitividade às indústrias, se tornou imprescindível o movimento dos indivíduos participantes em direção a excelência operacional. Neste contexto, pode-se citar como fatores predominantes para suportar este desafio:

- ✓ Sustentabilidade;
- ✓ Eficiência;
- ✓ Qualidade;
- ✓ Produtividade;
- ✓ Baixo custo.

Contornando e interligando estes fatores está a Gestão de Ativos. Pilar para a garantia operacional das plantas produtivas em todos os aspectos acima citados. Impulsionando os gestores a focar a atenção na manutenção do complexo de equipamentos, avaliando o impacto do sistema de manutenção na estabilidade operacional e, conseqüentemente, na disponibilidade dos equipamentos.

Neste capítulo serão apresentados os contextos impulsionadores do trabalho, as premissas e metodologias utilizadas para a obtenção do resultado.

1.1 TEMA DE PESQUISA

Os estudos da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade dos ativos, identificam os elementos com maiores relevâncias nas ocorrências de falhas em diversos equipamentos de um sistema. Muitas indústrias (em particular as de manufatura e aquelas em que riscos humanos estão potencialmente envolvidos com falhas na manutenção) têm percebido a importante necessidade conexão entre manutenção e a confiabilidade. Assim buscando implementar cada vez mais programas de manutenção centrados em confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*) na gestão de seus ativos. Esses programas por sua vez têm como principal objetivo reduzir custos e aperfeiçoar a manutenção, promovendo melhorias na disponibilidade e segurança de equipamentos. O uso de técnicas de análise de confiabilidade possibilita um direcionamento mais efetivo dos investimentos de uma empresa, uma vez que permite inferir sobre os ganhos operacionais por meio de possíveis medidas para melhoria dos processos produtivos.

1.2 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

O sistema proposto a ser estudado por este trabalho faz parte de um Laminador de Tira a Quente inserido neste concorrido mercado mundial. Desta forma, mais do que nunca, o investimento em novas técnicas e tecnologias voltadas para o aprimoramento do processo produtivo e estabilidade operacional estão sendo colocados em prática para manter a empresa na vanguarda do setor de aço mundial.

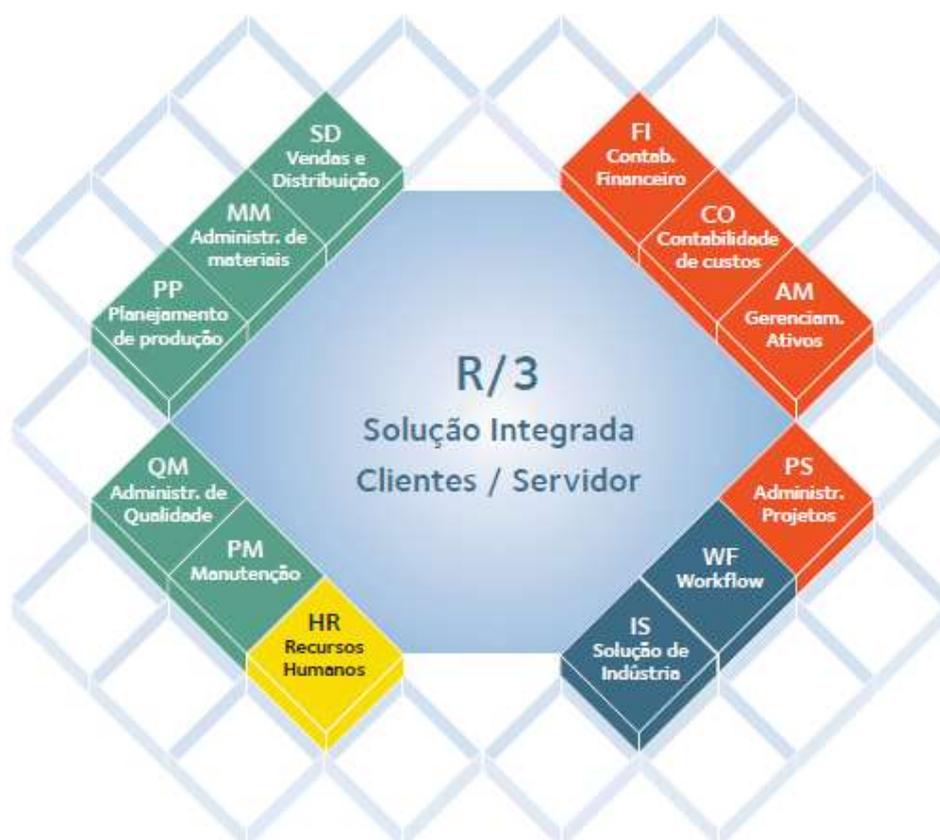
Os pilares da estratégia de manutenção da empresa são segurança, qualidade e estabilidade operacional. Quase que em sua totalidade, os autores de estudos sobre MCC consideram estes pilares como a base a serem adotadas nas análises de confiabilidade.

O trabalho se propõe a solucionar os problemas de manutenção ocorridos no sistema de transporte (Mesa de Enformamento) de placas de aço do Laminador de Tiras a Quente, causadores de ocorrências de perda de produção do Laminador

por paradas e atrasos imprevistos para manutenção corretiva. Sendo este sistema responsável por aproximadamente 20 horas de perda de produção no ano de 2018, contabilizando uma perda superior a 10,5 mil toneladas de aço, que correspondem a quase R\$ 1,8 milhões em perda financeira anual para a empresa, se considerarmos uma margem de contribuição de U\$ 180 por tonelada.

O Laminador objeto de estudo está em operação há 16 anos na ArcelorMittal Tubarão e atualmente é utilizado sistema SAP - ARMP (*Asset Reliability Management Program*) que permite interagir os conceitos de confiabilidade estabelecidos pelo grupo, padronização de cadastro e uniformização dos registros dos ativos para uma gestão ativa, suportando a gestão da manutenção, conforme apresentado na figura 1.1. Tendo como objetivo agrupar e armazenar todas as informações referentes à manutenção, assim como as estratégias, plano e custo de manutenção dos equipamentos.

Figura 1.1 – Módulos do Sistema SAP.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão – Plano Diretor de Manutenção e Gestão de Ativos.

Voltado para a manutenção, é utilizado o módulo SAP – PM que é utilizado para realizar o planejamento, viabilizar a execução e controlar os serviços durante uma intervenção da manutenção, conforme representado na figura 1.2. O sistema SAP - PM se integra dentro do sistema com outros módulos, dentre eles SAP – CO, SAP – FI, SAP – MM, SAP – PS e SAP – IM.

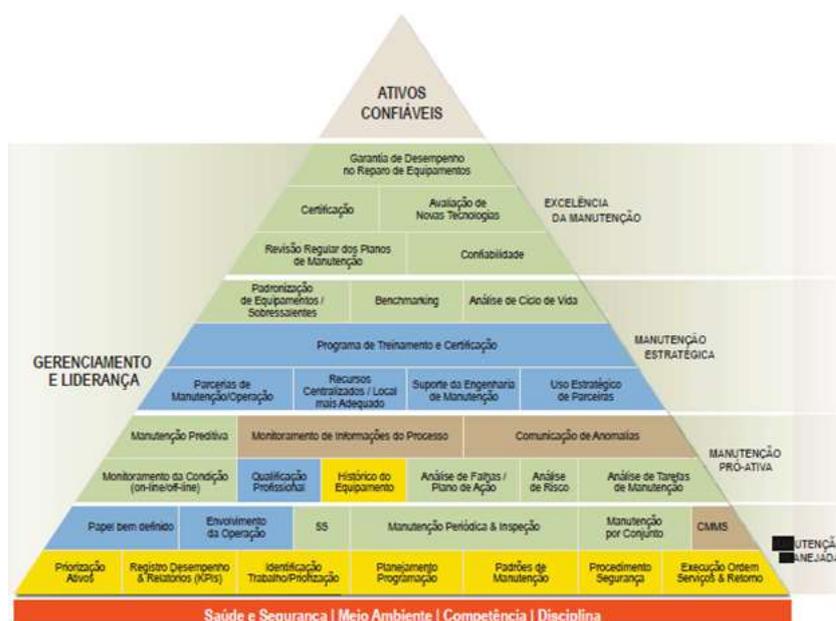
Figura 1.2 – Interdependência entre o SAP – PM e outros módulos.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão – Plano Diretor de Manutenção e Gestão de Ativos.

O processo de Confiabilidade dos Ativos preserva e melhora gradativamente a capacidade dos ativos para satisfazer aos requisitos de desempenho ao melhor custo, sendo que a Excelência em Manutenção é atingida após a consolidação de valores fundamentais.

Figura 1.3 – Modelo de manutenção definido para a ArcelorMittal.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão – Plano Diretor de Manutenção e Gestão de Ativos.

A representação da figura 1.3 traz a pirâmide que mostra os requisitos para atingir a Excelência em Manutenção, incluindo:

Requisitos básicos focados no estabelecimento de uma abordagem sistemática para gerenciar e executar manutenção.

- ✓ Requisitos de alto nível incorporando ferramentas e técnicas para aumentar o desempenho e a confiabilidade dos ativos;
- ✓ Liderança comprometida e gestão proativa.

Itens destacados em amarelo estão relacionados aos fundamentos do processo de confiabilidade dos ativos. Itens destacados em marrom estão relacionados à infraestrutura e englobam as ferramentas que suportam a execução do processo de confiabilidade dos ativos, sendo fundamental que os mesmos estejam alinhados com todo o processo de manutenção. Os itens destacados em verde são as melhores práticas (ferramentas, metodologias e abordagens) que suportam o processo e os itens em azul são os requisitos que suportam a abordagem de implantação. Estes requisitos otimizam a estrutura organizacional, trazendo clareza dos papéis e responsabilidades e aumentando a competência entre os colaboradores do site, conforme cartilha de manutenção de gestão de ativos implementada no ano de 2018.

1.3 OBJETIVOS

Neste tópico serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a confiabilidade do sistema de transporte de placas de aço do laminador de tiras a quente verificando se o mesmo está apto a cumprir sua meta estratégica de produção.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral do trabalho as etapas seguintes deverão ser implementadas.

- ✓ Realizar o levantamento e classificação dos dados históricos de falhas dos equipamentos do sistema de transporte (Mesa de Enfornamento) de placas de aço do Laminador de Tiras a Quente;
- ✓ Aplicar a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade para identificar as lacunas existentes no plano de manutenção em vigor;
- ✓ Definir ações de melhoria, preditivas ou preventivas para os diferentes modos de falhas identificados nas análises;
- ✓ Apoiar na implantação das ações oriundas do estudo;
- ✓ Propor estratégia de gestão de sobressalentes MRO a fim de manter níveis ótimos para atendimento ao nível de confiabilidade requerido pelo processo;
- ✓ Registrar o resultado do estudo e divulgar às equipes de manutenção da planta analisada.

1.4 JUSTIFICATIVA

Durante o ano de 2018 foi registrado no sistema de acompanhamento da produção do LTQ (AP) um total de 405 ocorrências de impacto da produção, sendo 275 ocorrências de atrasos ($1\text{min} \leq \text{Delay} < 3\text{min}$) e 130 ocorrências de paradas ($\text{Stop} \geq 3\text{min}$), totalizando 20,86h de perda de produção, devido às falhas de manutenção (Elétrica ou Mecânica) no sistema de transporte (Mesa de Enfornamento) de placas de aço. Isso, proveniente de um sistema de concepção simples no ponto de vista da manutenção uma vez que o mesmo se constitui de uma mesa de 113 rolos com acionamento através de motoredutores e uma estrutura denominada de balança que é responsável pela pesagem de todas as placas de aço a serem processadas no laminador. Tais fatos geram a necessidade de uma reavaliação da estratégia de manutenção dos equipamentos atualmente aplicada a este sistema. Nas análises anteriores de soluções dos problemas da manutenção, o conhecimento probabilístico do comportamento dos sistemas não era aplicado ou não haviam condições de ser desenvolvido, obrigando as equipes de gestão e manutenção a aplicar estratégias unicamente no conhecimento prático, proveniente da experiência dos colaboradores envolvidos com o processo e ou de recomendações referenciadas nos manuais dos respectivos equipamentos, sem considerar os fatores intrínsecos a cada conjunto pertencente ao sistema. Esse foi o cenário identificado no sistema em questão, pois, mesmo as estratégias estando em constante evolução, se encontrava carente de uma análise quantitativa para justificar melhorias e investimentos.

Basicamente o estudo proposto justifica a implementação de uma manutenção centralizada em confiabilidade (MMC). De acordo ainda com Lafraia (2001), confiabilidade é a probabilidade de que um componente ou sistema, funcionando dentro dos limites especificados de projeto, não falhe durante o período previsto para sua vida, sob condições definidas de uso.

O trabalho é justificado pela necessidade de aplicação da análise quantitativa, com o propósito de adequar a estratégia de manutenção para o sistema, buscando redução das falhas imprevistas, identificar e propor soluções para eliminar os modos de falha existentes.

O ganho financeiro será fator determinante para a priorização da execução do projeto, as ações necessárias necessariamente não serão a curto prazo, visto que, há a necessidade de um planejamento de custo e execução para as soluções a serem implementadas que nos leva a crer uma “visão do amanhã” deve ser prevista com um grau de confiança aceitável e com base em histórico de dados e troca de experiências de várias áreas.

1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA APLICADA

Quanto a sua natureza, este estudo se classifica como pesquisa aplicada, com o objetivo de analisar fenômenos e gerar conhecimento para aplicação prática, direcionados à solução de problemas específicos de um sistema. Os métodos quantitativos que serão abordados podem contribuir para a atualização da estratégia de manutenção de diferentes indústrias.

Este trabalho classifica-se, quanto à forma de abordagem, como pesquisa qualitativa e quantitativa. A interpretação de fenômenos e falhas e a atribuição de significados, não requerendo o uso de métodos e técnicas estatísticas, em alguns casos, podem ser consideradas como base da pesquisa qualitativa. Neste estudo, a abordagem quantitativa será utilizada para análises probabilísticas de dados históricos de falhas em equipamentos de um sistema, para suporte a um modelamento capaz de representá-lo com qualidade e fidelidade, de onde será possível a quantificação das falhas no tempo desejado.

Em relação aos procedimentos técnicos, este trabalho utilizará os conceitos de ADV (Análise de dados de vida) ou, do inglês, LDA (*Life Data Analysis*) aplicados em dados estruturados de falhas em equipamentos, com o objetivo de embasar uma pesquisa dos fenômenos que possuem impacto na confiabilidade do sistema.

Aplicando essa metodologia podem-se disponibilizar, com embasamento técnico, resultados para que se alcance melhoras as metas operacionais, reduzindo riscos e custos a partir da identificação de vulnerabilidades de partes de um sistema, como por exemplo, para o subprocesso de carregamento de placas de aço, que

poderia limitar ou impactar a produção de um laminador de tiras a quente. Com base em dados capturados desse sistema, pode-se estimar a disponibilidade média, o tempo médio entre falhas, o número de falhas esperadas e os custos dessas falhas ou se há aumento delas. Apurados e tratados a avaliação desses resultados permite garantir de forma mais assertiva a tomada de decisões estratégicas no que tange a priorização de investimento.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos, que serão abordados de forma simplificada neste tópico.

O primeiro capítulo apresenta sucintamente o modo como abordaremos o assunto a ser estudado e as premissas necessárias para que se alcancem os objetivos gerais e específicos, citam as ferramentas, as variáveis e premissas a serem consideradas para que os dados históricos se tornem entradas válidas para os softwares a serem utilizados. Ainda superficialmente menciona o modelo de gestão de ativos implementado e praticado dentro do grupo da ArcelorMittal.

O segundo capítulo desenvolverá a contextualização do estudo, ao explicitar de maneira geral os aspectos técnicos e funcionais de um Laminador de Tiras a Quente e abordar de forma mais aprofundada os aspectos do sistema de transporte (Mesa de Enfornamento) de placas de aço, que será objeto de estudo e análise para determinação e aumento da confiabilidade.

O terceiro capítulo trará o estudo em relação aos conceitos de engenharia da confiabilidade que serão utilizados como metodologia e ferramentas para as análises quantitativa da confiabilidade, também trata de forma sucinta o histórico do estudo da confiabilidade. Os conceitos abordados neste capítulo serão aplicados ao objeto de estudo, de forma a alcançar os objetivos específicos do trabalho.

No quarto capítulo serão definidas as premissas utilizadas para parametrização do software de modelamento do sistema, também aborda a forma e

sistemas utilizados para aquisição de dados históricos de falhas dos equipamentos com a qualidade requerida para o estudo, grande desafio para qualquer análise de confiabilidade. O tratamento dos dados e resultados das simulações também será tratado neste capítulo, assim como a identificação dos modos de falha com maior impacto na confiabilidade do sistema e as propostas para eliminação destes.

O quinto capítulo constituirá da análise conclusiva do trabalho, demonstra as premissas utilizadas para colocar em prática as ações propostas no capítulo quatro e detalha o memorial de cálculo dos ganhos projetados para o estudo, sobretudo ganhos não mensuráveis que pôde-se observar durante a realização do trabalho.

2 ÁREA DE APLICAÇÃO

Neste capítulo será abordado, de forma sucinta, o processo de produção de aço da ArcelorMittal Tubarão e o funcionamento dos diferentes sistemas que fazem parte do processo de produção de bobinas de aço, sequenciando as etapas do processo e objetivando contextualizar o sistema a ser estudado entre os demais sistemas.

O processo de laminação a quente é um processo de transformação mecânica do aço, da forma de placas até chapas grossas ou bobinas com espessuras na faixa de milímetros. Ele consiste na redução da seção transversal por compressão do metal, através da passagem entre dois cilindros aço ou ferro fundido, com eixos paralelos e acionados por motores para que girem em torno de si mesmos (ABAL, 2015), com o torque necessário para impulsionar o material no sentido de laminação.

É denominada laminação a quente, pois este processo é realizado com o material aquecido entre 1160°C a 1300 °C, levando-o à sua região plástica. Nesta região a ductibilidade do material é máxima e, no processo de laminação, ocorre a recristalização dinâmica na deformação plástica do aço, agregando diferentes propriedades ao produto laminado.

2.1 ARCELORMITTAL TUBARÃO

Líder mundial na produção de aço, o Grupo ArcelorMittal está presente em mais de 60 países, com unidades industriais e representações comerciais. Sua gestão, direcionada a Transformar o Amanhã, é embasada em três pilares:

- ✓ Sustentabilidade;
- ✓ Qualidade;
- ✓ Liderança.

O Grupo ArcelorMittal, maior fornecedor mundial de aço bruto, possui fontes próprias de matérias-primas (minério de ferro e carvão mineral) e uma ampla rede de distribuição.

O Grupo tem como orientação estratégica investir continuamente em pessoas e tecnologia, buscando, por meio de pesquisa e desenvolvimento, consolidar e ampliar sua liderança.

A ArcelorMittal Brasil é a maior produtora de aço do país, com capacidade instalada superior a 12,5 milhões de toneladas/ano. Com plantas industriais em seis estados, emprega cerca de 17 mil pessoas. Produz aços longos e planos de alta qualidade para indústrias automobilística, de eletrodomésticos, embalagens, construção civil e naval. Também atua em mineração, geração de energia, produção de biorredutor renovável e tecnologia da informação. Sua ampla rede de distribuição e serviços atende às demandas dos mercados doméstico e internacional.

A ArcelorMittal Aços Planos América Latina – Brasil é constituída pelas empresas ArcelorMittal Tubarão, ArcelorMittal Vega, ArcelorMittal Contagem e suas filiais.

Seu foco é produzir aços planos de alta qualidade para atender às demandas dos mais exigentes setores. Suas unidades industriais operam integradas, produzindo laminados a quente, a frio, revestidos e produtos beneficiados com alto padrão de qualidade.

A ArcelorMittal Tubarão é uma unidade de produção integrada de aços planos, localizada na Região Metropolitana da Grande Vitória (ES), na região Sudeste do Brasil. Com capacidade de produção anual de 7,5 milhões de toneladas de aço em placas e bobinas a quente, emprega diretamente cerca de 5 mil pessoas e outras 5,1 mil indiretamente. Sua localização, junto a um complexo logístico que inclui infraestrutura portuária, ferroviária e rodoviária, favorece a disponibilidade de insumos e matérias-primas, assim como o transporte de produtos para os mercados interno e externo, conforme pode ser visto na foto aérea da Figura 2.1.

Figura 2.1 – Foto da área do ArcelorMittal Tubarão e suas áreas operacionais

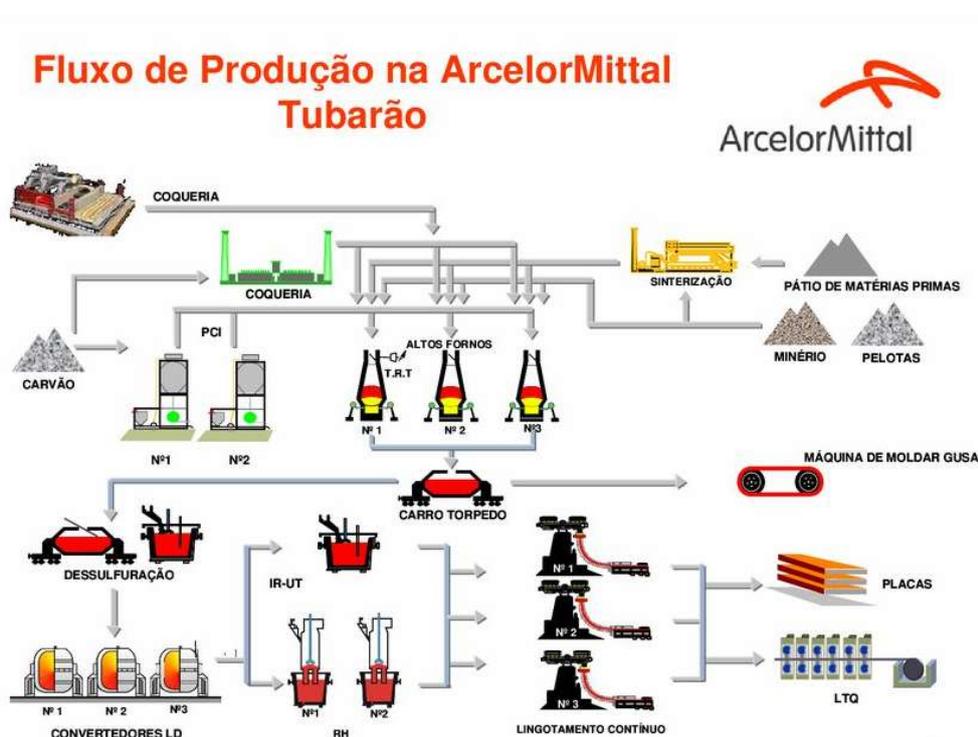


Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

Com uma cultura corporativa focada no compromisso com o desenvolvimento sustentável, é uma das líderes entre os fornecedores de aço de alta qualidade e ocupa posição de vanguarda em Gestão Ambiental e é referência na Gestão de Recursos Humanos, com destaque para as ações de desenvolvimento profissional e de promoção da Saúde e Segurança.

Junto com a unidade de Vega, instalada na Região Sul do Brasil, Tubarão faz parte do Grupo ArcelorMittal, maior produtor de aço do mundo. As duas plantas atendem ao segmento de aços planos produzindo placas, bobinas a quente, laminados a frio e galvanizados, comercializados para os mercados interno e externo. É um processo integrado que resulta em um amplo mix de aço, conforme pode ser visto na ilustração do fluxo de produção da Figura 2.2.

Figura 2.2 – Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

O fluxo de produção acima é característico de uma usina integrada, no qual, contempla todas etapas de um processo produtivo de aço, iniciando na obtenção das matérias primas, passando pela área de redução obtendo-se o ferro gusa logo em seguida a área do aço obtendo-se o aço propriamente dito e por fim os processos de conformação tendo como produtos finais as placas e bobinas de aço.

2.2 O LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE

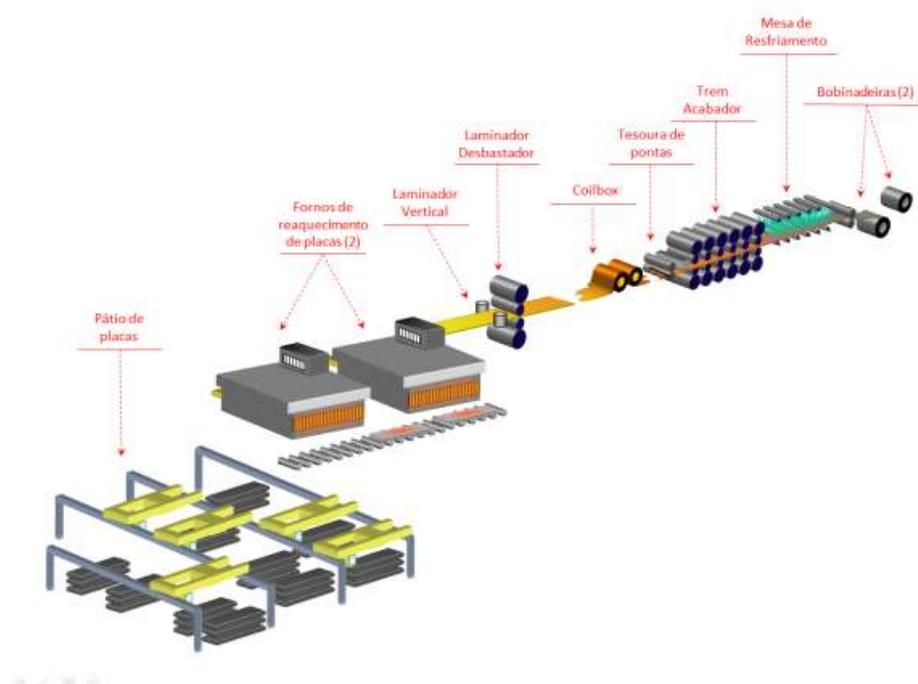
Com a decisão estratégica da ArcelorMittal Tubarão de diversificação de seus produtos, ampliando sua atuação no mercado de produtos semi-acabados de aço, a empresa optou por investir na aquisição de um Laminador de Tiras a Quente com o qual pudesse produzir bobinas laminadas a quente, produto este de maior valor agregado e com possibilidade de atuar também no mercado doméstico, com margens de lucro atraentes. Para manter o alto padrão de qualidade e custos baixos

com que atua e é reconhecida no mercado internacional, a empresa buscou adquirir um equipamento que apresentasse a mais atualizada tecnologia disponível no mercado e com condições de atender uma variada gama de espessura e largura de material a ser processado.

Assim sendo, em agosto de 2002 se deu a partida do Laminador de Tiras a Quente. Objeto de estudo, o mesmo possui 16 anos de operação e faz parte de uma usina integrada de produção de aço. Após o *startup* alguns projetos de investimentos foram aplicados para aumento da produção do Laminador e atualmente possui uma capacidade de produção de 4 milhões de toneladas/ano, com projetos em andamentos para aumento de produção para 4,5 milhões esperados para ano 2020, este Laminador permite a fabricação de bobinas com grande variação de características metalúrgicas, tamanho e espessura.

Como visto na figura 2.3, A laminação é um dos processos de conformação mais utilizados nas indústrias, devido o processo apresentar alta produtividade e controle dimensional bastante preciso, permitindo a obtenção de produtos que não seria possível por outros processos.

Figura 2.3 – Layout geral do Laminador de Tiras a Quente



Fonte: Adaptação ArcelorMittal Tubarão (2019).

Na laminação de tiras a quente, placas são convertidas em tiras, as quais devem atender as especificações estabelecidas em termos de propriedades mecânicas, forma, dimensões, acabamento superficial, dentre outros critérios. As tiras transformam-se em bobinas depois de processadas e bobinadas.

Durante as etapas da laminação, deve-se efetuar o controle de qualidade do produto para se detectar defeitos superficiais, dimensionais ou de planicidade, a fim de se evitar que um produto com excesso de defeitos, portanto, rejeitável, continue sendo processado, com desperdício de tempo e energia.

As principais etapas para obtenção de bobinas a quente são:

- ✓ Estocagem de placas;
- ✓ Sequenciamento de placas;
- ✓ Aquecimento de placas;
- ✓ Desbaste inicial;
- ✓ Laminação de acabamento;
- ✓ Resfriamento da tira;
- ✓ Bobinamento da tira.

2.2.1 Pátio de Placas

O pátio de placas tem por finalidade receber as placas de aço provenientes das máquinas de lingotamento contínuo e condicionamento, e armazená-las até que sejam enviadas através do sistema de transporte de placas para o forno de reaquecimento, na sequência e no tempo determinado. Seu volume de armazenamento é de cerca de 55.000 toneladas, sendo subdividido em três pátios (A, B e C) e possuindo seis pontes rolantes com capacidade de 66 toneladas cada uma, conforme pode ser visto na vista aérea do pátio de placas da Figura 2.4.

Figura 2.4 – Vista Aérea do Pátio de Placas



Fonte: O autor (2019).

Durante a operação do Laminador de Tiras a Quente, as seis pontes rolantes operam simultaneamente, sendo que cada um dos pátios (A, B e C) trabalha duas pontes. Também há a possibilidade de recebimento de placas, provenientes do condicionamento de placas via caminhão e ou composição ferroviária.

2.2.2 Fornos de Reaquecimento de Placas

O forno de reaquecimento tem a função de realizar o reaquecimento controlado das placas a serem laminadas até a temperatura de desenformamento, a cerca de 1.250°C , conforme o material a ser processado. Sua capacidade de produção é de 400 toneladas por hora por cada um dos fornos. O forno é composto de 9 zonas de aquecimentos que gradativamente, elevam a temperatura das placas homogeneamente com o auxílio de queimadores laterais e superiores. A placa é posicionada em frente ao forno e, em seguida, enfornada com o auxílio da máquina de enformamento, conforme pode ser visto na foto do carregamento da Figura 2.5.

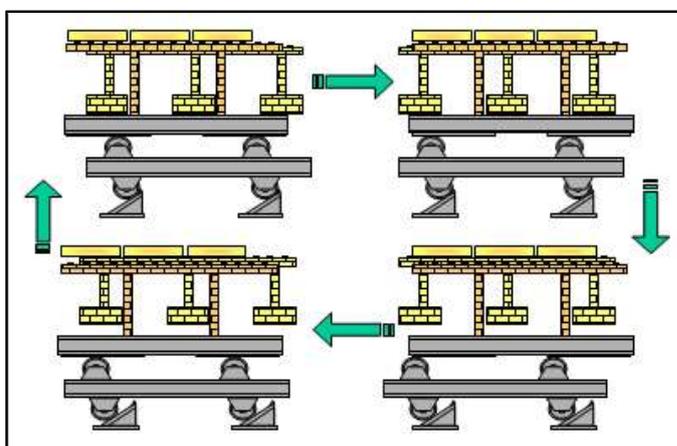
Figura 2.5 – Carregamento de Placas nos Fornos



Fonte: O autor (2019).

Os combustíveis são substâncias que ao se combinarem com o oxigênio do ar (comburente), resultando em chamas e liberam calor necessário para o aquecimento das placas de aço. Os combustíveis utilizados no forno de aquecimento de placas da ArcelorMittal Tubarão são: o gás Natural (GN) e o gás Misto (MG) que é composto pelo gás de Coqueria (COG) e o gás de Alto-forno (BFG).

Uma vez que a operação de carregamento das placas esteja completa, a placa fica sustentada pelas vigas fixas e desloca-se com o auxílio das vigas móveis, denominadas *Walking beans*, conforme ilustração da figura 2.6.

Figura 2.6 – Funcionamento dos *Walking beans* do Forno de Aquecimento

Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

Depois de totalmente aquecida, a placa é extraída do forno com o auxílio da máquina de desenformamento. Durante seu movimento inicial, a porta de desenformamento é parcialmente aberta, descobrindo os espaços na parede refratária de descarregamento, os quais permitem a entrada dos braços da máquina no forno a um nível abaixo das placas, isso assegura que a porta esteja completamente aberta por um período mínimo, assim reduzindo perdas de aquecimento, a máquina içará a placa acima do nível das vigas fixas, retraindo e colocará a mesma na mesa de rolos, conforme ilustrado na figura 2.7.

Figura 2.7 – Descarregamento do Forno de Reaquecimento



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

Devido à complexidade e alto custo de atuação da manutenção dos fornos, há um planejamento específico para as campanhas de manutenção a serem realizadas, sendo que no período de 1 ano, somente há 03 paradas de manutenção que se faz o desligamento dos 02 fornos que fazem parte do Laminador de Tiras a Quente.

2.2.3 Laminador Desbastador

O desbastador reversível foi projetado para produzir uma espessura de esboço entre 20 mm até 40 mm, para placas de 200 mm a 250 mm de espessura. Contudo, a prática operacional em laminadores de tiras a quente ao nível de espessura de esboço, varia de planta para planta. Projetado para ser um laminador reversível o RM possui um controle de abertura feito por um par de parafusos mecânicos de acionamento elétrico e um par de cápsulas hidráulicas (VAI UK,

2000). A estrutura do laminador desbastador é compartilhada com o laminador vertical, assim como os sistemas de controle, que necessitam operar em perfeito sincronismo. Podemos observar a estrutura dos laminadores na fotografia 2.8.

Figura 2.8 – Laminador Vertical e laminador Desbastador

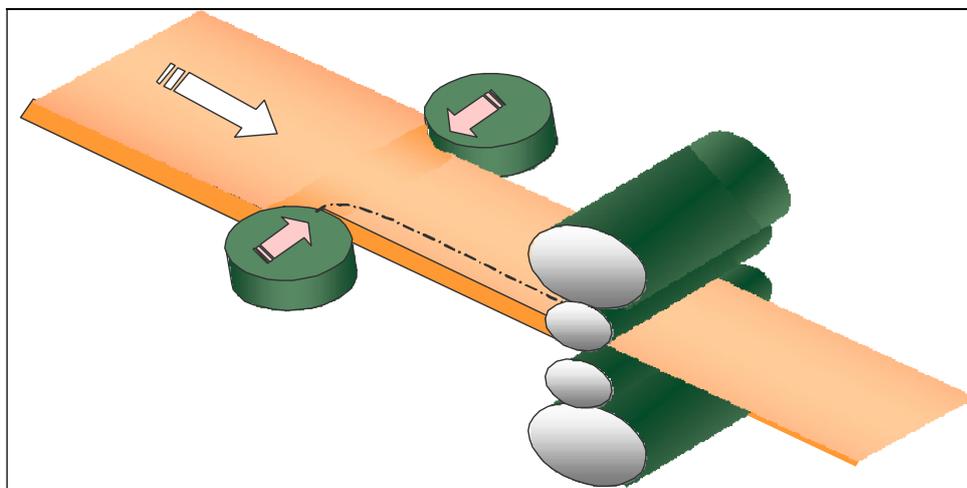


Fonte: O autor (2019).

O laminador é do tipo quádruo reversível e promove grandes reduções de espessura no material, partindo de uma espessura máxima de 250 mm até uma espessura final do esboço entre 20 e 40 mm. Sua potência total é de 15.000 kW, tendo acoplado a ele um laminador vertical que garante a largura desejada do esboço laminado.

Nesta etapa, a placa é forçada a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos, com a mesma velocidade superficial e espaçados entre si a uma distância menor que o valor inicial do material a ser deformado. À medida que a placa passa entre os cilindros, a espessura diminui e o comprimento aumenta, até que a placa se transforme num esboço. Conforme ilustrado na figura 2.9.

Figura 2.9 – Funcionamento esquemático do laminador desbastador



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

O material laminado é deslocado, em cada passe, por entre os cilindros, sendo que a abertura dos mesmos define a espessura do passe. A redução da espessura por passe é de aproximadamente 50% e depende da dureza da liga que está sendo laminada. No último passe de laminação, o material apresenta-se com espessura em torno de 40mm e é chamado de esboço ou chapa grossa.

2.2.4 Coilbox

Equipamento único na siderurgia brasileira, o Coilbox propicia uma redução substancial do comprimento total da mesa de saída do laminador desbastador e, conseqüentemente, do comprimento total do LTQ (cerca de 200m) e também permite melhor homogeneidade de temperatura entre a cauda e o topo do esboço a ser laminado no Trem Acabador (cerca de 15°C contra 70°C no sistema convencional).

Durante o processo de desbobinamento do esboço, o mesmo é transferido de posição para que seja dado espaço para que um novo esboço seja bobinado. A Figura 2.10, mostra o momento exato do desbobinamento.

Figura 2.10 – Coilbox



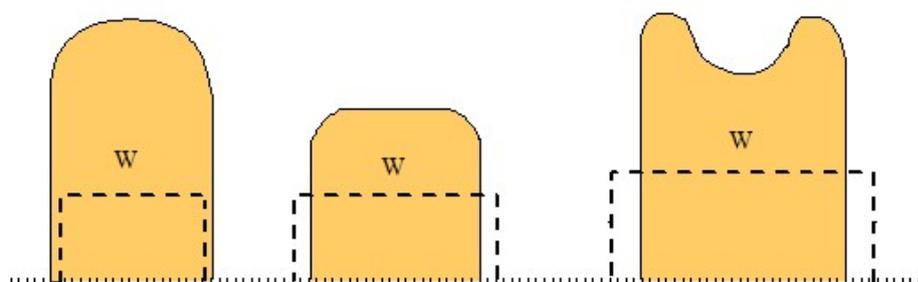
Fonte: O autor (2019).

A utilização do Coilbox no processo de laminação da ArcelorMittal Tubarão, é estabelecida através dos tipos de materiais a serem processados, sendo que, somente aplica-se o equipamento para os tipos de aço mais críticos no qual se requer um maior controle e ou homogeneidade da temperatura do processamento.

2.2.5 Tesoura de Pontas

Os esboços de aço laminados no laminador desbastador possuem pontas fora de esquadro, as chamadas línguas e rabos de peixe, em suas extremidades de entrada e saída, respectivamente. Conforme mostrado na figura 2.11, existem 1diferentes tipos de pontas e caudas de esboços, conforme taxa de redução de espessura e largura no processo de transformação da placa em esboço.

Figura 2.11 – Detalhes de diferentes tipos de pontas de esboço após laminação



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2008).

A tesoura para corte de pontas está localizada antes do laminador de acabamento, cortando estas partes de modo a possibilitar uma inserção estável no trem acabador. A tesoura possui tambores superior e inferior acionados por um motor elétrico, através de um redutor (SMS Demag, 2000).

2.2.6 Trem Acabador

O Trem Acabador é considerado o “coração” do LTQ, promove a redução da espessura do esboço de 30 a 40 mm para espessuras finais entre 1,2 e 16,0 mm. Sendo do tipo *tandem* quádruplo, possui seis cadeiras de laminação com todas as tecnologias hoje disponíveis e potência total de 48.000 kW, sendo 8.000 kW por cadeira. A velocidade máxima de saída da tira, na última cadeira (chamada de F6), pode ser de até de 20 m/s, ou aproximadamente 72 km/h.

Este equipamento confere ao material, os principais itens de qualidade requeridos pelos clientes. O trem acabador é provido com tecnologia *Continuously Variable Crow* (CVC), *Work Roll Shift* e *Work Roll Bending* em todas as cadeiras. É composto também de controle de tensão entre cadeiras (*Tensometer Looper*) e controles automáticos de espessura (*Automatic Gauge Control – AGC*).

Depois da descarepação secundária, o topo do esboço entra nas cadeiras de laminação diminuindo a espessura à medida que passa por entre as cadeiras. A abertura entre os cilindros (*GAP*) é previamente estabelecida (*setup*) e de acordo com o comportamento do material, ao passar entre as cadeiras, as tecnologias citadas acima, atuam de forma que a tira esteja com todos os itens de qualidade

dentro do que foi pré-estabelecido pelo sistema de nível 2 do laminador. Conforme mostrado na figura 2.12.

Figura 2.12 – Detalhe de uma cadeira de um Trem Acabador



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2010).

Dentre os equipamentos empregados no processo de laminação, o Trem Acabador possui os equipamentos com maiores complexidades, sendo o mesmo responsável pela maior quantidade de paradas por falhas operacionais do laminador.

2.2.7 Mesa de Resfriamento

O material ao passar pelo Trem Acabador deve ser resfriado até a temperatura específica de bobinamento, também chamada de TB. No resfriamento, desde a temperatura de acabamento (saída do Trem Acabador) até a temperatura de bobinamento, ocorrem transformações metalúrgicas na estrutura do material relacionadas à estratégia de resfriamento adotada, ou seja, no final do resfriamento, fica definida a estrutura metalúrgica da tira. Quanto maior a velocidade (taxa) de resfriamento do aço, maior será seu limite de resistência e dureza.

O sistema de resfriamento é do tipo “*Laminar Flow*”, fluxo laminar de água não turbulento, gerado através de um conjunto de cortinas ou lâminas de alta densidade na face superior e spray, ou bicos de jato de água, na face inferior. Este tipo de sistema garante faixas de controle de temperatura estreitas e permite diferentes estratégias de resfriamento.

O sistema *Laminar Flow* é composto por 15 bancos superiores e 15 bancos inferiores, cada banco, por sua vez, possui 4 chuveiros com 84 tubos cada e 12 chuveiros com 46 tubos, superiores e inferiores respectivamente. Também estão presentes válvulas pneumáticas para liberação ou bloqueio da água enviada aos bancos, assim como válvulas hidráulicas para basculamento dos bancos para manutenção ou para auxiliar a retirada de sucata. Um tanque acumulador de água está montado a um nível acima dos chuveiros de refrigeração, e possui a função de contribuir para o envio de um fluxo de água constante aos chuveiros, amortecendo qualquer variação de vazão e pressão que possa ocorrer no bombeamento de água desde a estação de tratamento de água (ETA) do Laminador, indicados na figura 2.13.

Figura 2.13 – Vista geral de um sistema de resfriamento de bobinas



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2018).

Dados técnicos da mesa de resfriamento:

- ✓ Espaçamento cilíndrico: 320 mm, para a primeira seção de saída da cadeira de laminação F6 até o começo da linha de resfriamento laminar e 380 mm, para demais rolos;
- ✓ Refrigeração dos rolos: dos 268 rolos, 23 do final do trem acabador até o início dos chuveiros de resfriamento laminar são resfriados internamente, os próximos 189 rolos na região dos chuveiros da mesa de resfriamento são resfriados externamente dois a dois e os demais 56 rolos, após a região dos chuveiros até as bobinadeiras, não possuem refrigeração;
- ✓ Diâmetro do rolo: 300 mm
- ✓ Comprimento do corpo do rolo: 2.050 mm
- ✓ Velocidade máxima da mesa: 18.0 m/s

2.2.8 Bobinadeiras

Sendo a última parte do processo, as bobinadeiras recebem o material em movimento oriundo do Trem Acabador e já resfriado durante a passagem na Mesa de Resfriamento e, através de rolos puxadores e rolos abraçadores o direcionam em torno do mandril já em movimento rotativo, conformando o mesmo e transformando a tira em bobina.

Para o processo de bobinamento são utilizadas bobinadeiras hidráulicas que utilizam rolos abraçadores e um mandril expansível para a realização da conformação da tira em bobina. É projetado para bobinar tiras de 1,0 a 16mm de espessura, realizando um bobinamento com temperatura, formato e tensionamento adequados, gerando uma bobina de qualidade e que atenda às necessidades dos clientes. Conforme demonstrado na figura 2.14

Figura 2.14 – Vista frontal de uma bobinadeira em operação



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2018).

Após o bobinamento do material, as bobinas são extraídas pelo equipamento específico denominado de carro extrator. Após a extração as bobinas, são depositadas no berço localizado a frente de cada uma das bobinadeiras.

2.2.9 Conveyor

A área do *conveyor* compreende toda a movimentação das bobinas desde sua extração da bobinadeira até o pátio de resfriamento de bobinas. Pode ser operado em modo manual ou automático.

Possui como principais equipamentos, o carro de içamento de bobinas (*coil lifting car*), as máquinas de Cintar, o carro de transferência de bobinas (*coil transfer car*), as vigas caminhantes 1 e 2 (*walking beams*), a balança de pesagem, a máquina de marcar, a mesa de abaixamento (*lowering table*) e os carros de transporte de bobinas (*loop cars*). Toda a área do conveyor tem a finalidade de acondicionar, identificar e transportar as bobinas produzidas no laminador para o pátio de resfriamento e estocagem de bobinas (BQ-0), local este onde as bobinas a quente

(BQ) são descarregadas pelas vigas caminhantes 3, 4 e 5 (*walking beans*) e posteriormente armazenadas nos pátios de resfriamento.

2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram detalhados os aspectos técnicos e operacionais que constituem um Laminador de Tiras a Quente (LTQ). Estes detalhes serão considerados nos capítulos seguintes para definir as premissas de simulação dos sistemas.

Considerando os aspectos demonstrados, é perceptível que os componentes e equipamentos que compõem um LTQ estão expostos às condições críticas de operação e sofrem degradações agressivas durante seus ciclos de vida.

- ✓ Calor;
- ✓ Esforços mecânicos;
- ✓ Particulados de aço (carepa);
- ✓ Colisões de material durante o processamento;
- ✓ Água e vapor.

Estas intempéries são responsáveis pela diminuição drástica da vida útil dos componentes, causando falhas imprevistas e perda de produção decorrente a isso. Os modos de falhas gerados por estes aspectos serão abordados nos capítulos a posterior e ações para eliminação serão propostas.

3 CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Dentre as diversas literaturas e autores de bibliografias a respeito de confiabilidade, pode-se identificar muitas semelhanças entre as definições desta área de estudo, na totalidade das definições estão presentes alguns atributos importantes, tais como probabilidade, função, tempo e condições.

3.1 CONFIABILIDADE

Correlacionando as diversas definições de confiabilidade, pode-se resumir seu conceito como sendo a probabilidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições específicas e por um período determinado (MOUBRAY, 1997; NBR 5462, 1994).

A confiabilidade de um componente é quantificada utilizando um modelo matemático que descreve sua probabilidade de falha para diferentes idades. Este modelo é uma função de densidade de probabilidade estatística, em inglês, PDF.

Da alegação de Marcorin e Acackerli:

O domínio da confiabilidade nos produtos confere à empresa uma vantagem competitiva em relação aos seus concorrentes, que se traduz, na prática, na melhor alocação de custos de garantia e de suporte, inventário de peças de reposição mais adequado e menor custo estendido de seus produtos ao longo do ciclo de vida dos mesmos. (MARCORIN; ACACKERLI, 2001, p. 2)

É possível traçar um paralelo com a confiabilidade de componentes de um sistema. Os quais, uma vez possuindo elevada confiabilidade, permitem um avanço produtivo, redução de custos e otimização dos estoques de sobressalentes, todos estes fatores correlacionados, contribuem para a sustentabilidade do negócio e agregam uma vantagem competitiva dentre os outros concorrentes.

3.2 CONCEITOS DE FALHA

Pode-se definir a falha de um item como sendo qualquer desvio identificável de sua condição original o qual não é satisfatório a um uso ou funcionamento específico (MORTELARI, 2014). Para determinar quando uma condição não é satisfatória, entretanto, precisa-se definir parâmetros alinhados a um contexto operacional e qualificar as consequências da falha. Para uma análise quantitativa é necessária a definição clara entre o que é satisfatório ou não, com contornos bem definidos para cada item.

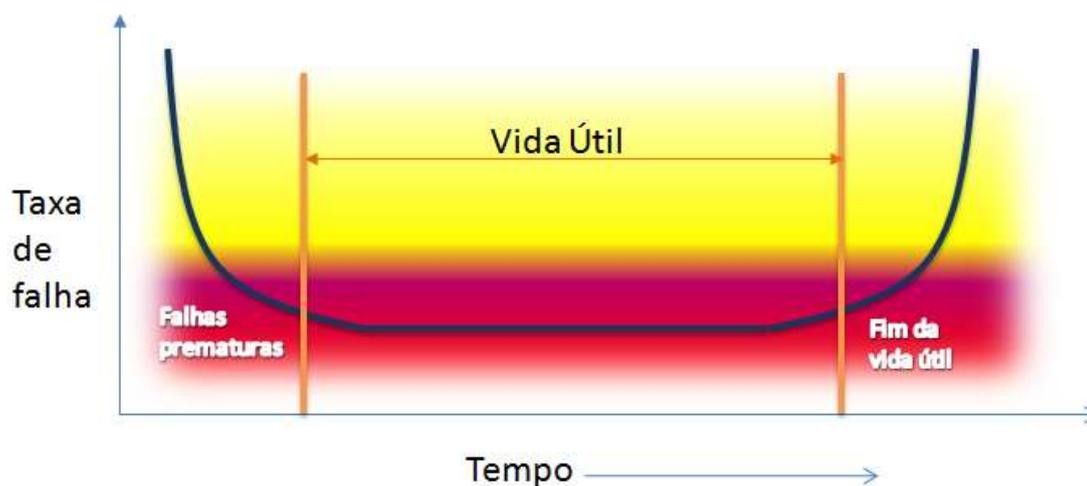
3.2.1 Falha Funcional

Um ativo falha se ele é incapaz de fazer o que seus usuários querem que ele faça. Qualquer ativo pode sofrer uma variedade de estados de falha, dependendo das funções que realiza. Por essa razão, é mais sensato definir falha em termos de perda de funções específicas, em vez de falha total do ativo.

3.2.2 Mecanismos de falha

Todo componente irá entrar em estado de falha durante algum período de sua vida, quando não for capaz de desempenhar sua função dentro das condições de operação desejadas. Desta forma as taxas de falha foram modeladas conforme um padrão denominado “curva da banheira”, conforme exemplo da figura 3.1 abaixo. Sendo proposto que a taxa de falha é alta no início da vida operacional do componente, caracterizando uma falha prematura, decresce à medida que o tempo de operação aumenta, tende a se estabilizar quando chega a sua vida madura, e aumenta paulatinamente ao final de sua vida útil (GUTIÉRREZ, 2005).

Figura 3.1 – Curva da Banheira

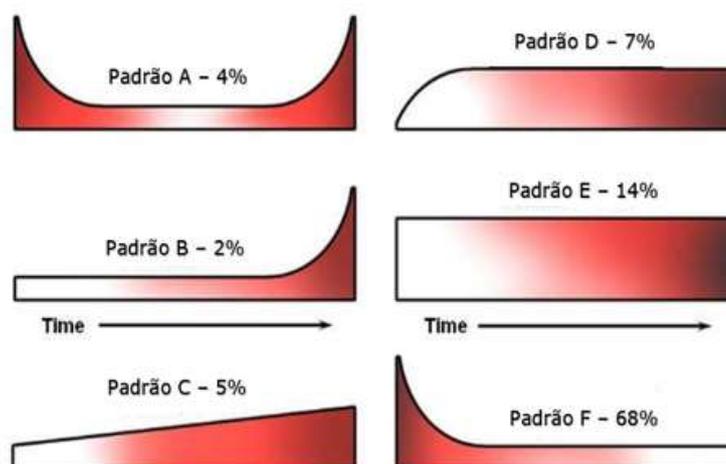


Fonte: <https://pcmusina.wordpress.com/2011/07/13/manutencao-baseada-na-confiabilidade/>

Esta distribuição não se mostrou adequada para a representação do comportamento da taxa de falha em sistemas complexos, com algum nível de automação e para componentes eletrônicos. Estes últimos possuindo uma taxa de falha constante, que corresponde a ocorrências de falhas aleatórias, como detalhado a seguir.

Nowlan e Heap analisaram o comportamento de diversos componentes e puderam identificar seis padrões de taxa de falhas distintos, ao longo da vida útil dos destes, mostrados pela figura 3.2.

Figura 3.2 – Padrões de falha



Fonte: <https://www.manutencaoemfoco.com.br/padrao-das-falhas/>

- ✓ Padrão A: típica curva da banheira, sendo caracterizada por uma mortalidade infantil, seguido de uma taxa de falhas constante com um aumento gradual ao término da vida útil. Exemplo de componentes que possuem este comportamento são peças estruturais, motores elétricos e peças simples;
- ✓ Padrão B: taxa de falha constante com um aumento significativo ao final da vida útil do equipamento. Típico de motores especiais e máquinas a pistão;
- ✓ Padrão C: aumento gradual da taxa de falhas durante a vida útil do equipamento, sem um período definido de desgaste (turbinas, engrenagens e rolamentos);
- ✓ Padrão D: equipamento apresenta taxa de falhas reduzida no início de sua vida útil ou após revisão, seguido de um aumento e estabilização da taxa de falha;
- ✓ Padrão E: taxa de falha constante para qualquer idade. Comportamento de alguns eletrônicos e lâmpadas;
- ✓ Padrão F: mortalidade infantil, seguida de uma estabilização ou pequeno aumento da taxa de falha (eletrônicos e softwares).

Em uma análise quantitativa, estes padrões são definidos pelo parâmetro de forma β . Um valor de $\beta < 1$ corresponde a uma taxa de falha decrescente, característica de mortalidade infantil, no início de um padrão “curva da banheira”, por exemplo. Para um $\beta = 1$ o comportamento da taxa de falhas é constante, sendo que as falhas ocorrem de forma aleatória. Já para um $\beta > 1$ a taxa de falhas é crescente, caracterizando falhas por envelhecimento ou desgaste, típicas do final de um padrão “curva da banheira” e da vida útil de alguns componentes.

3.2.3 Modos de falha

Pode-se encontrar em algumas normas a definição de modo de falha como sendo “a maneira como ocorre a falha em um item” (EN 60812, 2006) e “a maneira que uma falha é observada em uma função de subsistema ou componente” (TM 5-968-4, 2006). Enquanto a falha é associada à função do sistema, o modo de falha é

associado ao evento que provoca a transição para o estado de falha (SIQUEIRA, 2009).

Moubray (1997) afirma que a identificação de todos os modos de falha do sistema, possibilita prever o que acontece quando ele ocorre, avaliando o seu impacto e decidir o que pode ser feito para antecipar, prevenir, detectar, corrigir ou até mesmo eliminá-lo.

3.3 CONCEITOS DE DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE

Para a realização de uma análise quantitativa da confiabilidade de um sistema complexo, alguns conceitos necessitam ser definidos e aplicados. Neste tópico serão abordados conceitos importantes para concretização da análise.

3.3.1 Disponibilidade

Barlow e Proschan (1975) definem disponibilidade como “a probabilidade de um referido sistema reparável estar operando em um período específico”, ou seja, se especificado um período, seria a fração deste tempo em que o sistema esteve pronto para operar, neste caso, disponível. O parâmetro disponibilidade leva em conta o tempo necessário para reparo do sistema e é dado por (1):

$$A = \frac{U}{U + D}; \quad \text{Disponibilidade} = \frac{\text{tempo de funcionamento}}{\text{tempo de funcionamento} + \text{tempo de reparo}} \quad (1)$$

Pode haver sistemas que possuem manutenções preventivas no qual o tempo não é contado, em caso de as manutenções serem realizadas fora do horário de operação. Entretanto em sistemas que operam continuamente não há tempo disponível para manutenção, e qualquer tempo usado para esse propósito é contado como tempo fora de operação.

Para um sistema ideal no qual a taxa de falha do componente é constante, a disponibilidade também pode ser dada por (2):

$$A_{\infty} = \frac{M}{M + R} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2)$$

Onde,

MTBF – Tempo médio entre falhas

MTTR – Tempo médio para reparo

A disponibilidade pode ser interpretada como uma probabilidade, caso a disponibilidade para um dado período seja A , a probabilidade em um instante aleatório é também A .

3.3.2 Manutenibilidade

Manutenibilidade é definida como a probabilidade de sucesso de uma tarefa de reparo, em um tempo determinado. Em outras palavras, é a medição da facilidade e velocidade em que um sistema pode ser restaurado com sucesso após a ocorrência de uma falha.

É possível correlacionarmos manutenibilidade com confiabilidade, a segunda tem como ponto de interesse a variação do tempo médio entre falhas, entretanto a primeira tem foco no tempo médio para reparo. Quando combinamos uma análise de confiabilidade com uma análise de manutenibilidade podemos obter importantes parâmetros de desempenho do sistema, que auxiliam na tomada de decisão sobre ações de manutenção, projeto ou operação de sistemas reparáveis (RELIASOFT, 2016).

3.3.3 Importância da confiabilidade no tempo

Após o modelamento de um sistema com vários componentes, uma vez que a confiabilidade deste sistema é determinada, a determinação do componente menos confiável é imprescindível para direcionar as alterações e melhorias no projeto. Caso o componente que possua a menor confiabilidade seja o que causa mais efeito na confiabilidade do sistema, os esforços precisam ser prioritariamente concentrados neste item para que a confiabilidade do sistema seja aumentada. Em sistemas simples e em série, é fácil a identificação dos componentes com menor

confiabilidade, porém para sistemas complexos isso se torna uma tarefa complicada (Reliasoft, 2017).

Uma maneira de identificar o componente que possui maior impacto na confiabilidade global do sistema é por meio da medição da importância da confiabilidade daquele componente para o sistema. A importância da confiabilidade, I_R , de um componente i em um sistema com n componentes é dada por Leemis (1995) como (3):

$$I_{R_i}(t) = \frac{\partial R_s(t)}{\partial R_i(t)} \quad (3)$$

Onde:

R_s é a confiabilidade do sistema;

R_i é a confiabilidade do componente;

Neste trabalho a importância da confiabilidade dos componentes será calculada através da equação acima e utilização do software BlockSim®. O resultado da importância de confiabilidade de cada componente do sistema será utilizado para direcionar as análises de FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) para os componentes mais importantes, este parâmetro substitui o RPN (*Risk Priority Number*) amplamente utilizado para direcionamento qualitativo das análises de FMEA, porém na maioria dos casos tende a ser subjetivo.

3.4 CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE WEIBULL

Em resumo a análise de Weibull, também denominada análise de dados de vida, é uma ferramenta de análise que a partir de uma amostra representativa, possui a funcionalidade de fazer previsões de um produto dentro de uma população. Isto é feito por “encaixe” em uma distribuição estatística de dados de vida e esta distribuição pode então ser utilizada para estimar características importantes da vida deste produto tais como confiabilidade ou probabilidade de falha em um período específico.

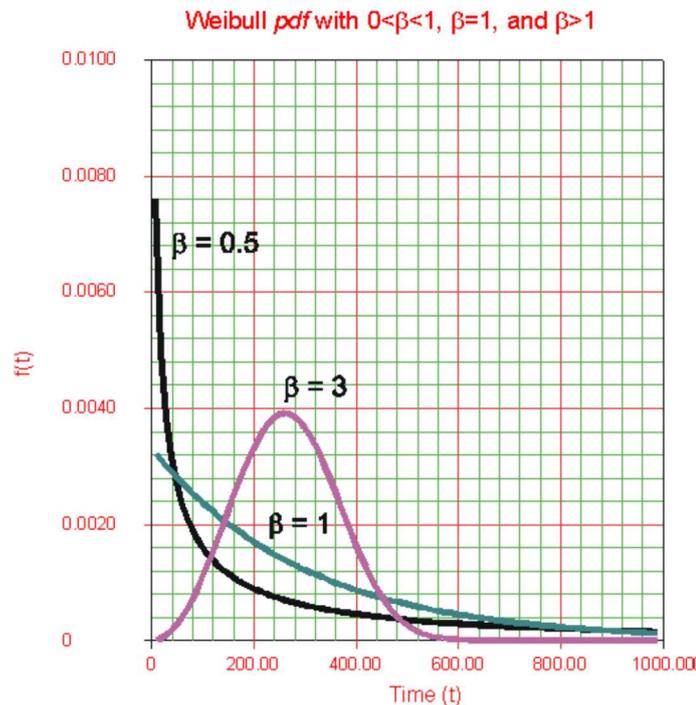
A fórmula de Weibull pode ser representada pela fórmula:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta}$$

Onde:

- $F(t)$ é a probabilidade de falha para uma determinada amostra;
- t é o tempo até a falha;
- η é a característica de vida ou parâmetro de escala;
- β é o parâmetro de inclinação ou forma.

Figura 3.3 – Efeito do parâmetro β na distribuição de dados de vida



Fonte: <http://www.reliasoft.com.br/Weibull/index.htm>

O parâmetro de forma β indica se a taxa de falha está crescente, constante ou decrescente. Se $\beta < 1$, é um indicativo de que o produto está com a taxa de falha decrescente. Este cenário é típico da chamada “mortalidade infantil”, indicando que o produto falha logo no seu período de “nascimento”. Se $\beta = 1$, é um indicativo de falha constante. São componentes que após sobreviverem ao “nascimento”

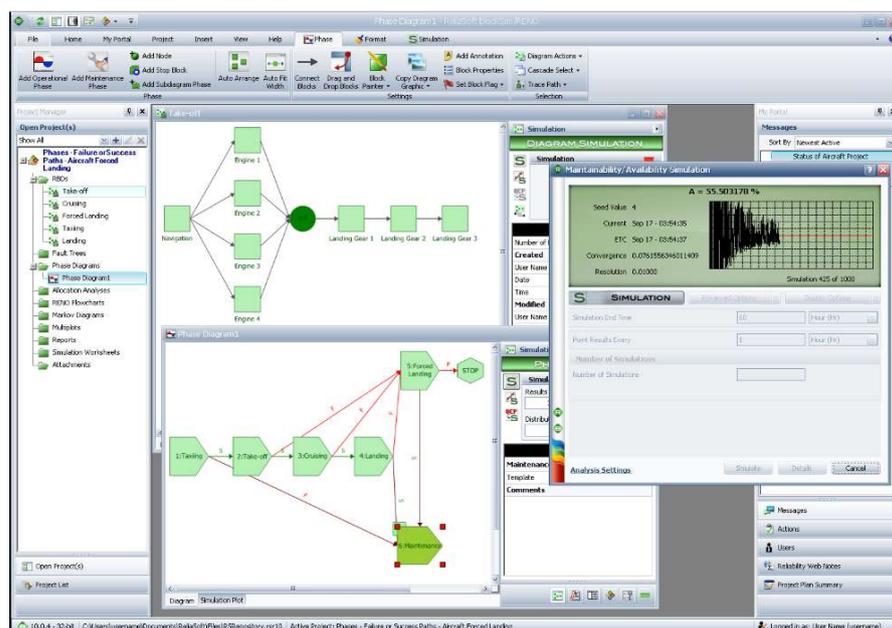
possuem uma taxa de falha constante. Se $\beta > 1$, temos então a situação de uma taxa de falha crescente. Este cenário é típico de produtos que falham por desgaste.

A análise de Weibull é um método de modelagem de dados conjuntos contendo valores maiores que zero (como exemplo, podem ser dados de tempo até a falha conhecido como *time-to-fail* (TTF). Uma característica importante desta análise, é que se houver a possibilidade de fazer uma coleta de 3 amostras, já é viável realizar o estudo de confiabilidade. Através da utilização de Weibull, é possível responder alguns problemas de engenharia.

3.5 METODOLOGIA DO DIAGRAMA DE BLOCOS - RBD

O BlockSim possui uma completa e flexível plataforma para modelar sistemas e processos utilizando Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD) e Análises de Árvore de Falhas (FTA). Possui diversas formas de configuração do RBD e das portas lógicas e eventos do FTA, incluindo funcionalidades para modelar sistemas complexos, carga compartilhada, redundância stand-by, diagrama de fases, ciclo de operação etc. Utilizando cálculos analíticos e simulação de eventos discretos, o BlockSim oferece uma grande variedade de análises para sistemas reparáveis e não reparáveis. Isso inclui análise de confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade, otimização da confiabilidade, produção (*throughput*), alocação de recursos, custo do ciclo de vida (LCC - *Life Cycle Cost*) e outras análises.

Figura 3.4 – Tela de exemplo do diagrama de blocos (RBD)



Fonte: <https://wildeanalysis.co.uk/wp-content/uploads/2016/08/image-reliasoft-blocksim.png>

Usando um algoritmo exclusivo da ReliaSoft, o BlockSim calcula analiticamente a função exata da confiabilidade do sistema, mesmo para os sistemas mais complexos. Os resultados calculados incluem confiabilidade, taxa de falhas, MTTF, tempo de garantia, Vida B(X), gráfico da “pdf”, gráficos de importância da confiabilidade. O usuário pode inserir informações de custo e melhoria de confiabilidade viável, para determinar a estratégia com o melhor custo-benefício para alcançar a meta de confiabilidade do sistema.

A capacidade de simulação do BlockSim para análise de manutenibilidade e de disponibilidade de sistemas reparáveis é mais real e sofisticada. Quando a simulação é utilizada, a análise pode considerar fatores como ciclos de operação, fatores de restauração, o tempo indisponível, os custos e a disponibilidade das equipes de manutenção e peças de reposição. O usuário também pode obter a modelagem apropriada para programação de manutenção que depende de outros componentes (pacotes de manutenção) e sistemas que passam por diferentes fases durante o tempo de sua operação (diagramas de fase). Os resultados da simulação podem ser utilizados em aplicações, incluindo:

- ✓ Escolher a estratégia de manutenção mais eficaz, considerando segurança, custo e disponibilidade;
- ✓ Determinar o intervalo ideal para manutenção preventiva (PM);
- ✓ Gerenciar o estoque de sobressalentes, considerando fatores como custo, taxa de utilização, restrições de suprimento;
- ✓ Identificar os componentes que têm o maior impacto sobre a disponibilidade.

Além disso, a análise de *throughput* do BlockSim pode ser utilizada para identificar gargalos, otimizar a alocação de recursos e melhorar a eficiência de processamento do sistema. Sempre que aplicável, o BlockSim permite que o usuário especifique os custos diretos e indiretos, associados com as estratégias de manutenção definidas, gerando uma variedade de resultados de simulação que serão fundamentais para uma avaliação real do custo do ciclo de vida dos ativos.

3.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram definidos conceitos importantes para fundamento das análises de confiabilidade, sobretudo quantitativas. A definição do contexto operacional, assim como da definição dos contornos entre a aceitação, ou não, de parâmetros de desempenho de itens de um sistema, é de suma importância para a calibração das simulações de confiabilidade e disponibilidade do sistema. E conforme Moubrey (1997) afirma, a identificação de todos os modos de falha do sistema, possibilita prever o que acontece quando ele ocorre, avaliando o seu impacto e decidir o que pode ser feito para antecipar, prevenir, detectar, corrigir ou até mesmo eliminá-lo.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão definidas as premissas utilizadas para parametrização do software de modelamento do sistema, também abordará a forma e os sistemas utilizados para aquisição de dados históricos de falhas dos equipamentos. E por fim resultados das simulações também será apresentado neste capítulo, assim como a identificação dos modos de falha com maior impacto na confiabilidade do sistema e as propostas para eliminação destes.

4.1 PREMISSAS PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Para definir critérios de acordo com o contexto operacional e simplificar as simulações, em casos onde os dados históricos não possuem a profundidade de detalhes necessária, algumas premissas serão adotadas.

- ✓ Na simulação foram considerados os componentes reparáveis como “tão bons quanto novos” ao retornarem à operação após o reparo. Pois não temos registros apurados dos retrabalhos e medições da taxa de eficiência dos reparos realizados;
- ✓ Quando os ativos apresentam características abaixo dos parâmetros aceitáveis, foram considerados como em falha, mesmo ainda não tendo deixado de executar as funções primárias. Ex.: identificação de falha em um acoplamento impossibilitando a transmissão de torque entre o conjunto motoredutor e rolo durante inspeção sensitiva nas paradas programada de manutenção. Ou seja, todos os componentes que foram substituídos preventivamente, em algum momento entre as constatações, apresentaram característica não aceitável;
- ✓ O estado de falha dos componentes só foi adotado no momento exato de perderem a capacidade de execução de suas funções ou da constatação preditiva do parâmetro fora dos níveis de aceitação;
- ✓ Componentes com curvas de contorno similares foram considerados como tendo uma mesma distribuição de falha e distribuídos em grupos;

- ✓ Será considerado que qualquer modo de falha que ocorrer em algum equipamento da mesa de recebimento irá afetar a produção no Laminador de Tiras a Quente;
- ✓ A concepção do sistema corresponde a um sistema totalmente em série. A falha em qualquer unidade de acionamento impacta na operação do recebimento;

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS HISTÓRICOS DE FALHAS

Com a finalidade de delimitar o horizonte do estudo, foi definido o intervalo de aquisição de dados em 12 meses, a partir de janeiro de 2018 até dezembro de 2018. Nesta janela é possível a identificação da maior parte dos modos de falha do sistema de recebimento com densidade de dados adequada para a análise.

Com este intervalo foram adquiridos 34.018 registros de paradas operacionais, distribuídos entre “*stop*”, paradas de produção acima de 180 segundos e “*delay*”, atrasos superiores a 90 segundos, em todo o Laminador de Tiras a Quente.

Para aquisição dos dados históricos de atividades de manutenção realizadas nos equipamentos do Laminador, diversos softwares precisam ser pesquisados e as informações registradas em cada um deles devem ser correlacionadas, de forma a extrair eventos registrados repetidamente, uma vez que estes sistemas em geral não possuem interligação e não registram todos os eventos de manutenção importantes para uma análise de confiabilidade.

Dados históricos para suportar a análise:

- ✓ Registro de falhas imprevistas dos equipamentos – Manutenção corretiva;
- ✓ Registro de intervenções preventivas nos equipamentos – Manutenção preventiva;
- ✓ Planos de manutenção programada – Manutenção preditiva e preventiva.

Figura 4.1 – Fluxo de aquisição de dados históricos



Fonte: O autor (2019).

Conforme a figura 4.1, para cada tipo de dado, um aplicativo empresarial possui informações com maior nível de detalhes. Na maior parte dos casos, os registros estão em mais de um aplicativo, porém contendo informações gerais que não permitem uma análise em detalhe. Para solução deste problema, às vezes, é necessário correlacionar os dados entre os aplicativos e mesclar as informações disponíveis, de forma a elaborar uma base com a qualidade necessária para o estudo.

4.2.1 SAP (ERP)

Este aplicativo é o SAP ERP, sistema integrado de gestão empresarial (ERP) transacional. O sistema procura contemplar a empresa como um todo, dividindo em módulos, onde cada módulo corresponde a uma área específica. Com principal objetivo o gerenciamento de manutenção, adquirido para concentrar todas as informações pertinentes à manutenção dos ativos da empresa, desde dados técnicos de equipamentos, passando por registro de reparos realizados nos conjuntos, até a programação e distribuição de recursos de manutenção.

Quais dados foram extraídos deste sistema?

- ✓ Registro de falhas imprevistas: todos os atendimentos e intervenções de manutenção realizadas são registradas no SAP pela equipe de atendimento a emergências, a nível de componente, assim como as análises de falha elaboradas para cada parada significativa imprevista de manutenção. Podem ser observados alguns desvios nos registros, com relação à ocasião de início e tempo gasto na intervenção, e falta de registros de algumas ocorrências por este motivo as informações necessitam ser correlacionadas com outros aplicativos;

- ✓ Atividades de manutenção preventiva: todas as atividades são registradas no SAP. Possuem detalhes das etapas realizadas, recursos utilizados e ocasião do evento e após a execução é dado o retorno no sistema, onde são feitos os registros pertinentes que foram observados durante a execução.

Atividades de manutenção sensível e preditiva: os planos de inspeção preditiva dos equipamentos e os resultados destas inspeções também são registrados neste sistema e estão disponíveis para consulta;

4.2.2 AP – Acompanhamento da Produção do LTQ

Aplicativo de gestão operacional, desenvolvido para registrar todos os dados pertinentes à operação do Laminador, de forma predominantemente automática. É um importante sistema para aquisição precisa de dados de paradas operacionais, previstas ou imprevistas, por registrar automaticamente qualquer intervalo acima de 180 segundos entre tiras processadas no Laminador, demandando ao operador um registro da natureza e motivo da parada. Também permite a correlação com variáveis de processo, tais como características do material processado, em alguns casos estas informações contribuem para o aumento da qualidade da análise.

Por ter sido desenvolvido para registros de informações operacionais, os detalhes de manutenção não possuem a profundidade adequada para uma análise

de confiabilidade. Os registros são classificados por indivíduos da produção e é possível identificar falhas nestas classificações que podem prejudicar uma análise, por esse motivo não pode ser unicamente utilizado para um estudo de confiabilidade de equipamentos.

Deste sistema foram extraídas todas as ocorrências de paradas de produção decorrentes de falhas em equipamentos e sistemas inseridos no processo de laminação, durante o ano de 2018.

4.2.3 SGT – Sistema de Gestão de Turno

Aplicação web utilizada para registro de comentários sobre ocorrências durante os turnos de produção. Este sistema é alimentado por um indivíduo específico de cada equipe de produção.

É uma importante ferramenta para complementar as informações em relação aos registros de paradas de produção do aplicativo AP, uma vez que são inseridos detalhes de cada ocorrência registrada. Em alguns casos não foram encontrados os comentários de registros abertos no AP.

Deste sistema foram extraídos detalhes das ocorrências de paradas de produção decorrentes de falhas em equipamentos.

4.3 RESULTADOS HISTÓRICOS OBTIDOS

Da compilação dos dados históricos obtidos pela pesquisa realizada, no período entre 01/01/2018 e 30/12/2018, podemos calcular alguns parâmetros importantes.

- ✓ Registros de 230 ocorrências de paradas (duração \geq 3min) em componentes da área dos pátios de placas;
- ✓ As falhas registradas para as especialidades mecânica e elétrica neste período corresponderam a 20,13 horas de perda de produção;

Tabela 4.1 – Perdas de produção e financeiras por ano na área do pátio de placas atribuída as especialidades mecânica e elétrica

Perda de produção		
Período observado	12	mês
Paradas imprevistas/ ano	22,13	hora
Produtividade média	704	ton/hora
Perda de produção / ano	15.579,52	ton
Perda financeira		
Margem de contribuição (bobinas de aço)	180	U\$/ton (ref: 02/2019)
Perda financeira / ano	2.804.313,6	U\$

Fonte: O autor (2019)

Analisando os tempos perdidos por falhas imprevistas neste sistema, podemos calcular a perda financeira relativa para um ano de operação, demonstrado na tabela 4.1.

Como os dados obtidos, correspondem a muitos equipamentos, para o trabalho proposto, será considerado somente as falhas da mesa de recebimento do pátio de placas nas especialidades mecânica e elétrica, totalizando registros de 130 ocorrências de paradas (duração ≥ 3 min), correspondente a 11,61 horas de perda de produção e perda financeira demonstrada na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Perdas de produção e financeiras por ano na mesa de recebimento atribuída as especialidades mecânica e elétrica

Perda de produção		
Período observado	12	mês
Paradas imprevistas/ ano	11,61	hora
Produtividade média	704	ton/hora
Perda de produção / ano	8.173,44	ton
Perda financeira		
Margem de contribuição (bobinas de aço)	180	U\$/ton (ref: 02/2019)
Perda financeira / ano	1.471.219,2	U\$

Fonte: O autor (2019)

As paradas destacadas acima na tabela 4.2, correspondem especificamente as paradas de manutenção mecânicas e elétricas da mesa

de recebimento, porém há outros equipamentos pertencentes a área do pátio de placas que não estão sendo considerados para o desenvolvimento do trabalho.

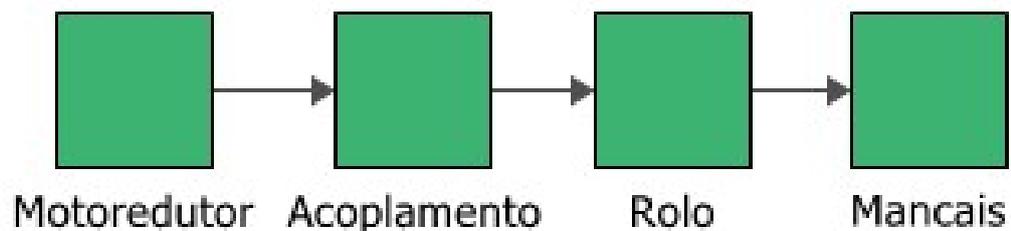
4.4 MODELAMENTO DO SISTEMA

Para a análise quantitativa cada unidade de acionamento do sistema de transporte e resfriamento foi dividida em 4 componentes básicos.

- ✓ Motoredutor;
- ✓ Acoplamento;
- ✓ Rolo;
- ✓ Mancais.

Esta divisão tomou como base a árvore de cadastro dos equipamentos no SAP. Dela obtém-se o diagrama de blocos de confiabilidade (RBD) da figura 4.2, utilizado para o modelamento do sistema.

Figura 4.2 – Diagrama de blocos de confiabilidade da unidade de acionamento



Fonte: O autor (2019)

Cada componente do RBD foi modelado através do software Weibull++© da Reliasoft© separadamente para obtenção da distribuição de falha, que será demonstrada nos próximos tópicos.

4.4.1 Falha em motores elétricos

Na tabela 4.3 estão disponíveis alguns dados técnicos dos motores instalados no sistema de recebimento de placas, para efeito de contextualização e comparação.

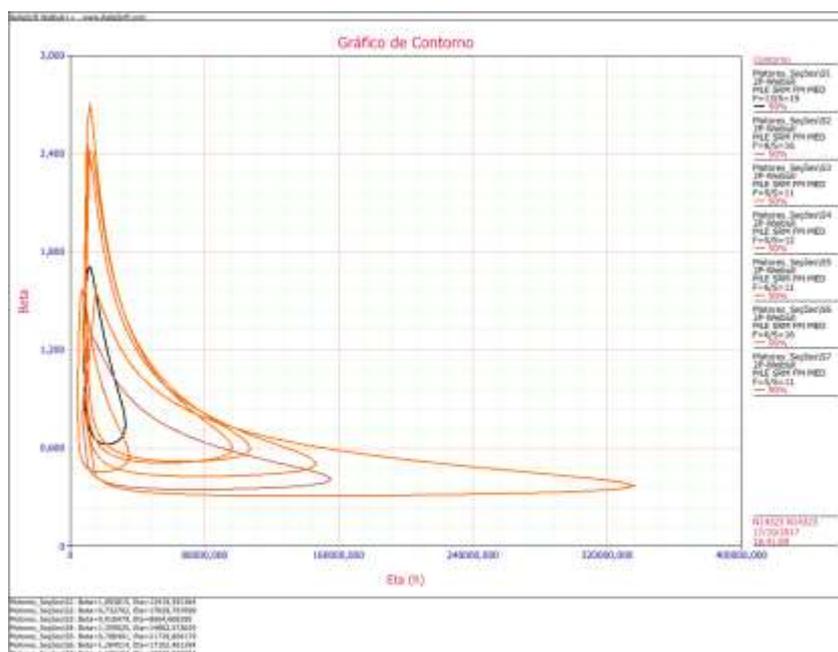
Tabela 4.3 – Dados técnicos dos motores

Alimentação	Trifásico	Potência	13,0 cv
Altitude	1000 m.a.n.m.	Polos	4
Categoria / Design	Categoria N	Carcaça	180M
Classe De Isolamento	F (DT=80K)	Tensão	400 V
Rendimento	91,7%	IP/IN	8,5
Fator De Serviço	1	Forma construtiva	B5T
Frequência	60 Hz	Temp. Amb. Máx.	40°C
Grau De Proteção	IPW55	Tipo de Acoplamento	Direto
Fator de Potência	0,83	Vida Útil do Mancal (h)	20.000 horas
Método de Partida	Inversor de Frequência	Refrigeração	Totalmente fechado sem Ventilação Externa
Norma	IEC	Regime de serviço	S1 contínuo

Fonte: WEG (2018)

Para o teste da hipótese os dados de falha obtidos foram classificados em subgrupos, divididos conforme as seções existentes no sistema. Os dados agrupados foram testados via software Weibull++© e foram traçados os gráficos de contorno sobrepostos para cada seção, sendo obtido o resultado conforme figura 4.3.

Figura 4.3 – Gráficos de contorno para motores elétricos



Fonte: O autor (2019)

Através da simulação dos dados com agrupamentos em nível de seção e análise dos gráficos de contorno para cada uma delas, podemos concluir pelas interseções entre as curvas que a hipótese apresentada deve ser rejeitada. Assim afirmamos que a taxa de falha em motores entre as seções da mesa de recebimento é diferente.

Com a rejeição da hipótese levantada para o comportamento das falhas em motores do sistema de recebimento de placas, para as simulações, podemos definir que a taxa de falha dos motores não é fortemente impactada pela posição do motor ao longo da mesa.

Desta forma, os dados de falha em motores foram inseridos em uma mesma análise e simulados, obtendo-se os parâmetros de confiabilidade da tabela 4.4 e curvas de confiabilidade e PDF das figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

O parâmetro de forma $\beta=1,57$, obtido pela simulação da distribuição de falhas em motores do sistema, define que os motores apresentam uma distribuição de falha constante com viés crescente ($\beta>1$). Para o parâmetro $\eta=233$ dias,

conclui-se que neste intervalo 37% dos motores falham, conforme a curva de distribuição simulada da figura 4.4.

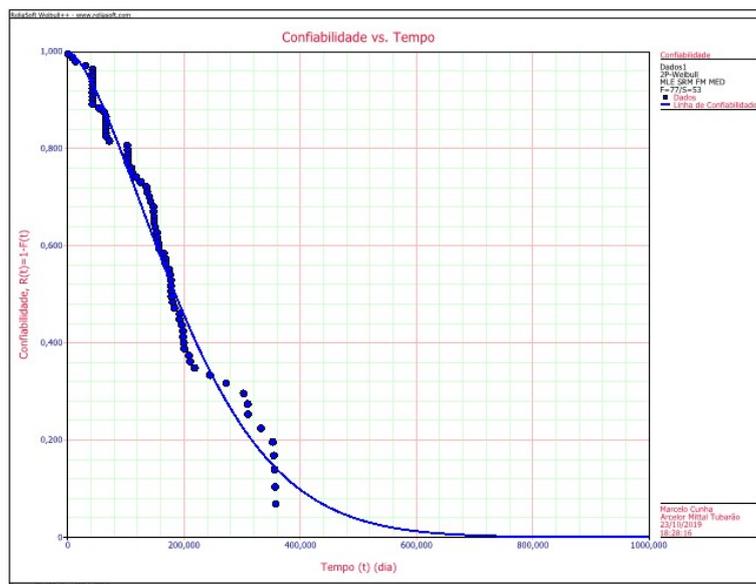
Tabela 4.4 – Parâmetros de confiabilidade dos motores do sistema de recebimento de placas

Relatório de Resultados	
Tipo de Relatório	Resultados do Gráfico
Informações do Usuário	
Nome	Marcelo Cunha
Empresa	Arcelor Mittal Tubarão
Data	23/10/2019
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Ranqueando	MED
Beta	1,570975
Eta (dia)	233,847725
Valor da LK	-494,189392
F \ S	77 \ 53
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=0,020924	CV Eta Beta=- 0,281572
CV Eta Beta=- 0,281572	Var-Eta=291,553284

Fonte: O autor (2019)

Para a simulação foi escolhida uma distribuição de Weibull com dois parâmetros e uma análise de máxima verossimilhança, por possuir uma maior aderência com os dados de falha, que possuem uma quantidade considerável de suspensões à direita, quando a falha não ocorreu dentro do período de observação.

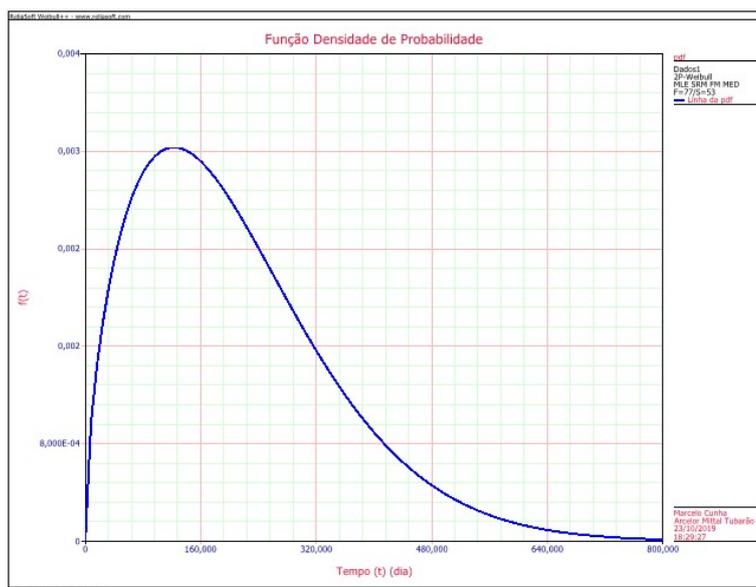
Figura 4.4 – Curva Confiabilidade x Tempo para motores da mesa de recebimento



Fonte: O autor (2019)

Fica evidente com a análise do gráfico da figura 4.8 uma densidade maior de falhas no intervalo de 0 a 200 dias, confirmado o valor do eta obtido.

Figura 4.5 – Função Densidade de Probabilidade de motores da mesa de recebimento.



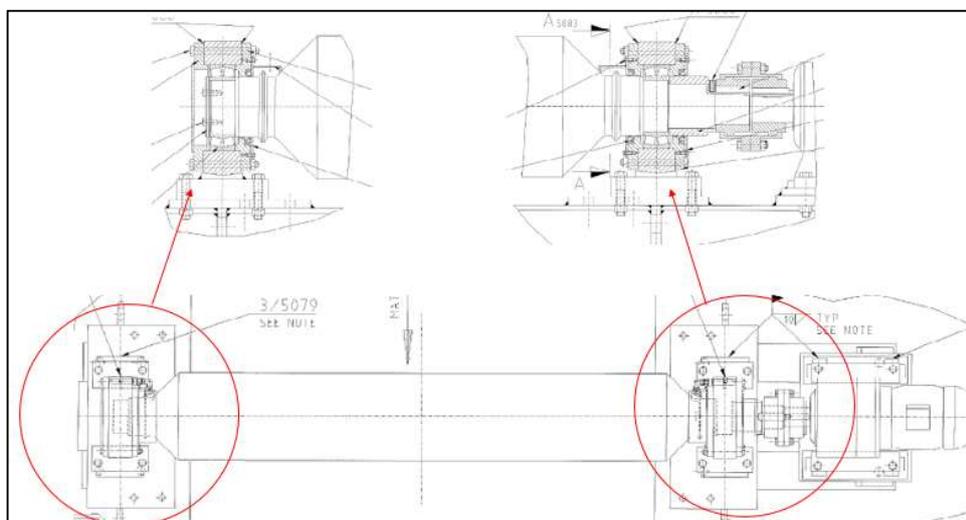
Fonte: O autor (2019)

A PDF disponível na figura 4.5 e obtida através da distribuição de falhas em motores possui comportamento de uma lognormal, com uma concentração maior de falhas no intervalo correspondente ao eta obtido de 233 dias.

4.4.2 Falha em rolos e mancais

Desde o início das operações não há registro de falha do corpo do rolo e mancais, basicamente os conjuntos são compostos por um corpo de rolo, fabricado em aço carbono SAE 1035 e 02 mancais, também construídos de aço carbono ASTM A36 e em cada um dos mancais é montado um rolamento autocompensador de rolos com referência comercial 23128 CCW33. Conforme figura 4.6, pode-se observar a forma construtiva do conjunto.

Figura 4.6 – Projeto de construção do conjunto do rolo e mancais



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão - Desenho B5201MX05075 (2019).

Para controle dos rolos há um plano de medição de desgaste dos rolos, sendo que até a presente data, nenhum dos 113 rolos que fazem a composição da mesa de recebimento apresentou o desgaste máximo estimado de 10mm no diâmetro para a referida troca.

4.4.3 Falha em acoplamentos

O projeto original da mesa de recebimento de placas, foi contemplado o acoplamento rígido de engrenagens com referências comerciais junto as fabricantes de acoplamentos, a forma construtiva tipo duplo, material aço carbono, com engrenagens nos cubos e utilizado grade de aço para o sistema de acoplagem entre os cubos. A simulação da distribuição de falhas nos acoplamentos foi realizada, através da análise de máxima verossimilhança, que permitiu uma maior aderência aos dados encontrados, conforme tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros de confiabilidade dos acoplamentos da mesa de recebimento

Relatório de Resultados	
Tipo de Relatório	Resultados do Gráfico
Informações do Usuário	
Nome	Marcelo Cunha
Empresa	Arcelor Mittal Tubarão
Data	23/10/2019
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	1,627268
Eta (dia)	1017,721377
Valor da LK	-61,56929
F \ S	7 \ 123
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=0,243533	CV Eta Beta=- 235,944516
CV Eta Beta=- 235,944516	Var-Eta=284470,239459

Fonte: O autor (2019)

Os parâmetros obtidos pela simulação, disponíveis na tabela 4.4, $\beta = 1,62$, correspondem a um comportamento de taxa de falha moderada e padrão característico de falhas prematuras.

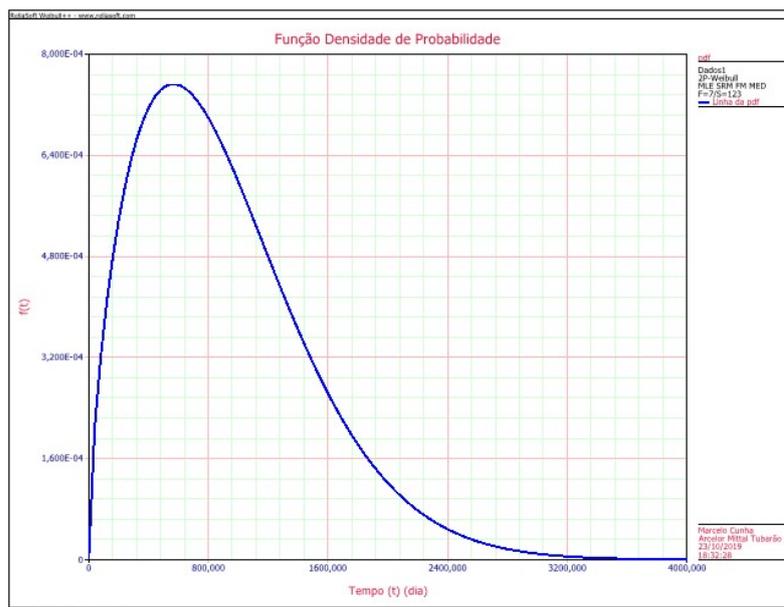
Figura 4.7 – Curva Confiabilidade x Tempo para acoplamentos da mesa de recebimento



Fonte: O autor (2019)

No gráfico da figura 4.7, pode-se observar a baixa densidade de falhas obtidas no período analisado e constatar a aproximação da curva pela análise da máxima verossimilhança.

Figura 4.8 – Função Densidade de Probabilidade dos acoplamentos da mesa de recebimento



Fonte: O autor (2019)

No gráfico da figura 4.8, fica evidenciada a PDF dos acoplamentos em operação no sistema, com comportamento de uma curva normal e concentração de falhas no intervalo de 450 a 650 dias, alinhado com o valor obtido para $\eta = 1017$ dias.

4.4.4 Falha em motoredutores

Cada conjunto da mesa de recebimento de placas possui redutor acoplado diretamente em um dos mancais do rolo. O redutor recebe o acionamento do motor e faz a transmissão do momento de torque diretamente ao rolo através do acoplamento. As taxas de falhas foram simuladas e os resultados podem ser observados na tabela 4.6.

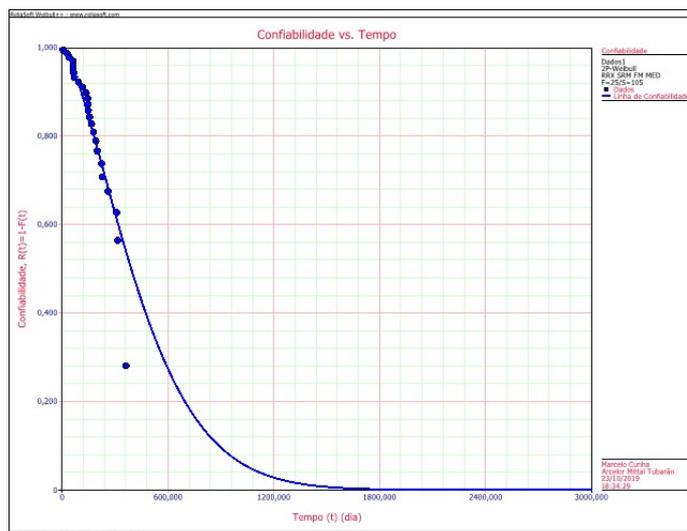
Tabela 4.6 – Parâmetros de confiabilidade dos redutores

Relatório de Resultados	
Tipo de Relatório	Resultados do Gráfico
Informações do Usuário	
Nome	Marcelo Cunha
Empresa	Arcelor Mittal Tubarão
Data	23/10/2019
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	RRX
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	1,466121
Eta (dia)	232,749441
Valor da LK	-188,366441
Rho	0,97055
F \ S	25 \ 105
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=0,055577	CV Eta Beta=- 16,431112
CV Eta Beta=- 16,431112	Var-Eta=9456,811556

Fonte: O autor (2019)

O valor de forma $\beta = 1,46$ obtido representa comportamento de taxa de falha moderadas e padrão característico da falha prematura, através de uma distribuição de Weibull bi paramétrica.

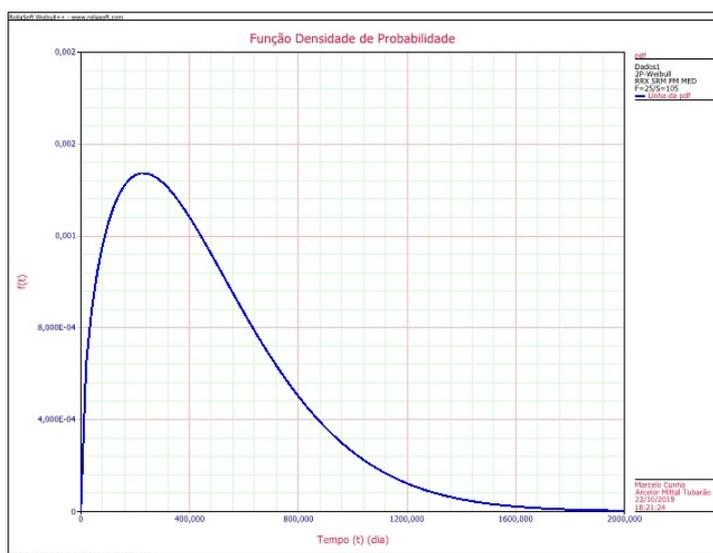
Figura 4.9 – Curva Confiabilidade x Tempo para motoredutores da mesa de recebimento



Fonte: O autor (2019)

Assim como na curva dos acoplamentos, no gráfico da figura 4.9, pode-se observar a baixa densidade de falhas obtidas e verificar a aproximação da curva pela análise da máxima verossimilhança.

Figura 4.10 – Função Densidade de Probabilidade dos motoredutores



Fonte: O autor (2019)

A PDF da figura 4.10, evidencia o valor de $\eta = 232$, ao representar uma maior concentração das falhas entre 180 e 220 dias de operação.

4.5 SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA

Após obtidas todas as distribuições de falha dos componentes do sistema, foi elaborado o RBD (*Reliability Block Diagram*) ou diagrama de blocos de confiabilidade no software BlockSim© da Reliasoft ©, para simulação do sistema operando com todas as interfaces.

Através desta simulação é possível obtermos a disponibilidade e confiabilidade de todo o sistema, para o determinado cenário operacional configurado.

4.5.1 Configuração do contexto operacional

Para obtenção de dados representativos, o contexto operacional do sistema foi inserido e configurado no BlockSim©, algumas premissas e características da estratégia de manutenção foram consideradas no software para modelamento do sistema.

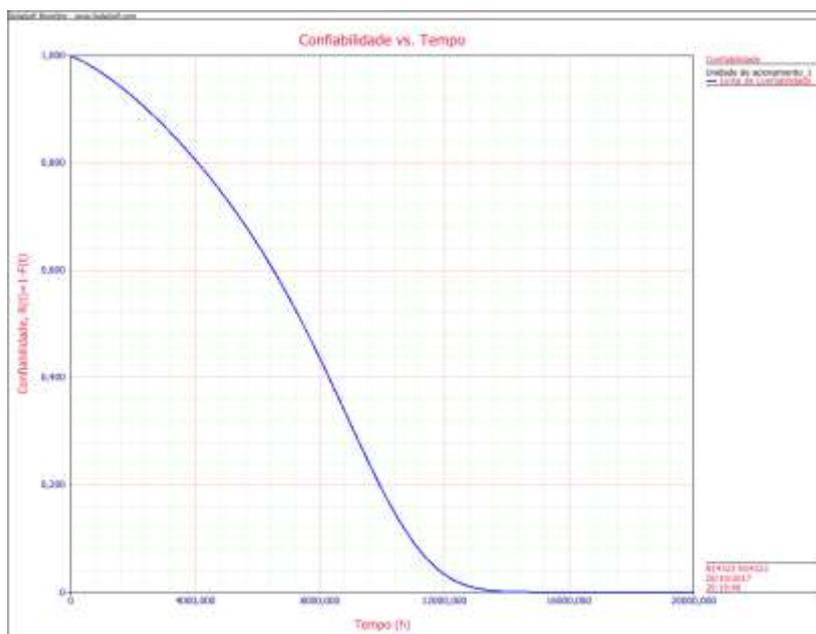
- ✓ Inseridas tarefas de inspeção semanal, frequência 7 dias, para cada componente do sistema e inspeções de paradas programadas a cada evento programado. Conforme plano de manutenção em aplicação no SAP;
- ✓ Foram inseridos os tempos médios para manutenções corretivas, com parada de produção, conforme seguem.
 - Troca de motoredutor: 4 horas
 - Troca de rolo: 8 horas
 - Troca de acoplamento: 6 horas
- ✓ Para as ações corretivas foi considerado que elas retornam o componente à condição de “tão bom quanto novo”, devido à ausência de dados históricos que permitam o modelamento da taxa de recuperação dos reparos realizados.

4.5.2 Modelamento e simulação da unidade de acionamento

Analisando os componentes, árvore de cadastro no SAP e as características da unidade de acionamento, pode-se definir um diagrama de blocos que represente este subsistema em termos de confiabilidade. Desta forma o diagrama da figura 4.4 foi construído no software BlockSim®, sendo nele parametrizados o modelo e coeficientes de confiabilidade obtidos pelas análises no Weibull++® e características referentes à estratégia de manutenção em vigor.

Uma vez completamente parametrizado, o modelo foi simulado e a curva da confiabilidade no tempo foi obtida conforme mostra a figura 4.11.

Figura 4.11 – Curva Confiabilidade x Tempo para a unidade de acionamento da mesa de recebimento



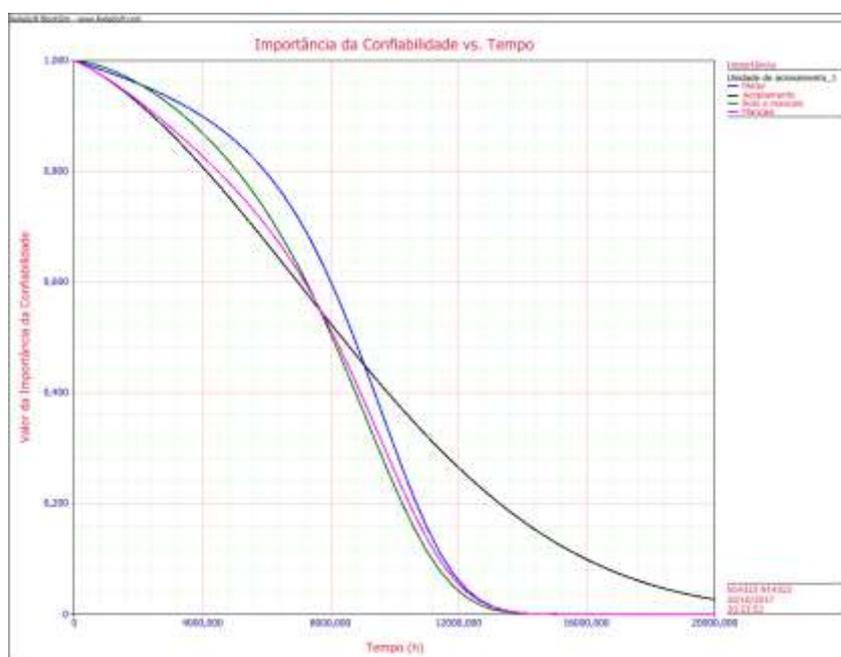
Fonte: O autor (2019)

A curva de confiabilidade da figura 4.11 demonstra uma característica de falhas por desgaste e envelhecimento em cada unidade de acionamento, a combinação do comportamento das falhas corresponde a uma confiabilidade que, no início da vida decai a uma taxa menor do que após a vida madura, entretanto

observamos que no intervalo de um ano de operação, ou aproximadamente 8.760h, a confiabilidade atinge valores baixos para o que se deseja destes subsistemas, em torno de 40%. As ações propostas devem objetivar aumentar a confiabilidade de cada unidade de acionamento a fim de contribuir para o aumento global da disponibilidade do sistema de resfriamento, através da análise dos componentes individualmente, conforme grau de importância, melhorias nos equipamentos e atualização das atividades de manutenção em vigor.

Na simulação, para aplicação do conceito de importância da confiabilidade visto no capítulo 4, foi plotado o gráfico da figura 4.12.

Figura 4.12 – Importância da confiabilidade para a unidade de acionamento



Fonte: O autor (2019)

Através das análises das curvas de importância da confiabilidade de cada componente do subsistema no tempo, pode-se observar que o item com maior importância para a confiabilidade do sistema varia conforme o intervalo a ser analisado.

Para o período inicial de operação, compreendido de 0h a 800h, observa-se que o motor possui maior impacto na confiabilidade, ou seja, apresenta uma probabilidade de falha maior neste intervalo. Entretanto, para uma vida madura ou

final da vida útil do sistema, o acoplamento passa a ser o item que maior impacta a confiabilidade do sistema.

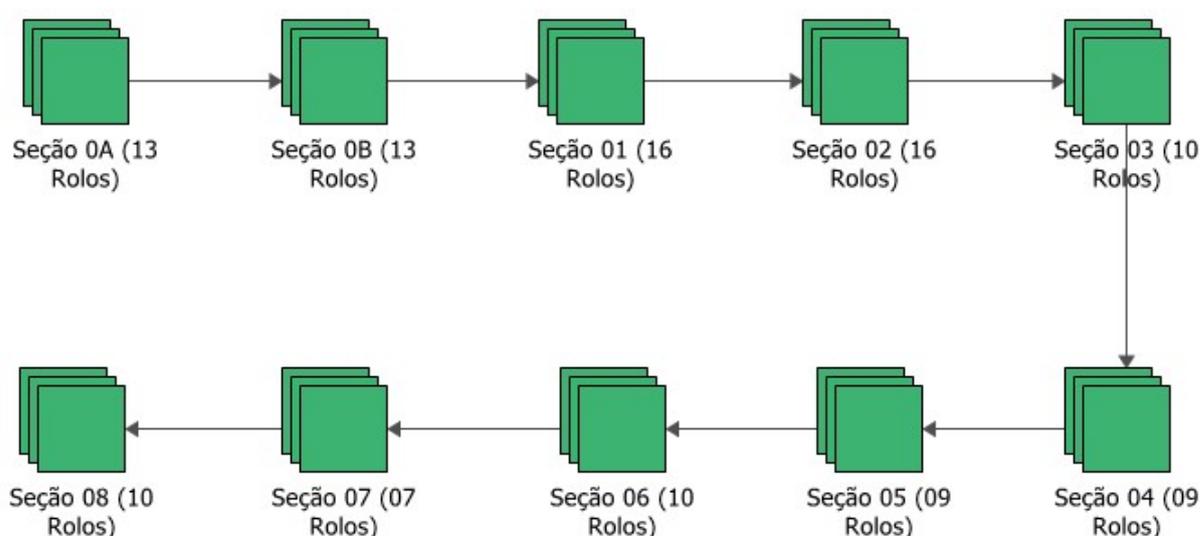
Delimitando o período da análise a um intervalo de 1 ano, aproximadamente 8760 horas, fica evidente ao analisar o gráfico da figura 4.12 que o motor é o componente que deve ser foco das análises dos modos de falhas e melhorias para aumento da confiabilidade do sistema.

4.5.3 Modelamento e simulação da unidade de acionamento

O sistema de transporte de placas de aço, por projeto, possui 10 seções, cada uma delas acionadas por um drive AC dedicado. No total, existem 113 unidades de acionamento operando em uma topologia série simples, sendo que a falha em qualquer uma delas poderá acarretar em parada imprevista de produção.

O sistema foi modelado no BlockSim© e utilizou-se blocos de agrupamento série que representam as seções em operação na mesa de resfriamento. Conforme ilustrado na figura 4.13.

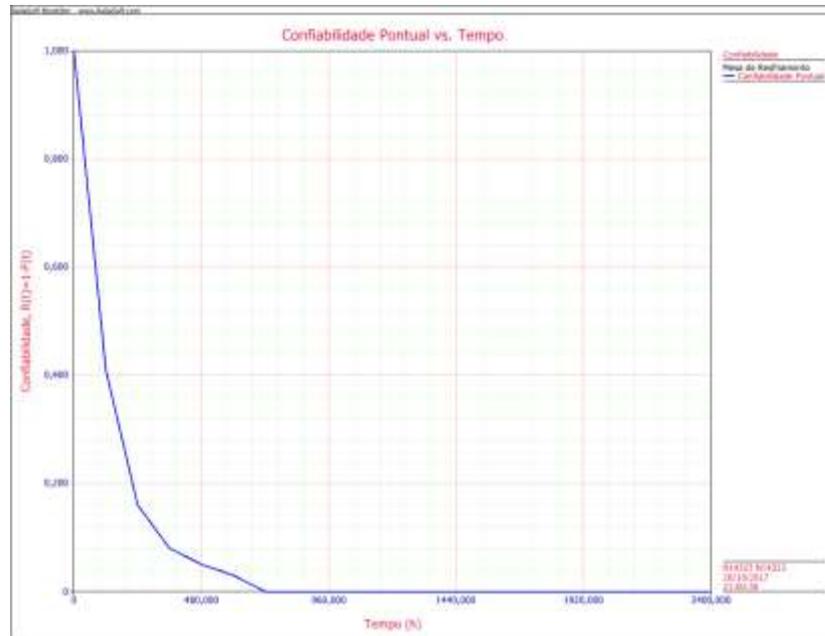
Figura 4.13 – Diagrama de blocos de confiabilidade do sistema de recebimento.



Fonte: O autor (2019)

Os resultados do modelamento podem ser observados no gráfico da figura 4.14, para o aspecto confiabilidade no tempo.

Figura 4.14 – Curva Confiabilidade x Tempo para o sistema de recebimento



Fonte: O autor (2019)

Mesmo com as unidades de acionamento possuindo confiabilidade relativamente alta, maior que 80% nas 4000h primeiras horas da missão, quando combinado diversas unidades em série, sobretudo neste valor projetado para o sistema de recebimento, pode-se observar uma queda substancial da confiabilidade ao analisarmos todo o sistema, disponível na figura 4.14. Essa queda na confiabilidade do sistema é justificada pela equação de confiabilidade de uma configuração série. Onde o sistema é composto por n componentes em série, obtendo (4):

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (4)$$

Onde:

R_s é a confiabilidade do sistema;

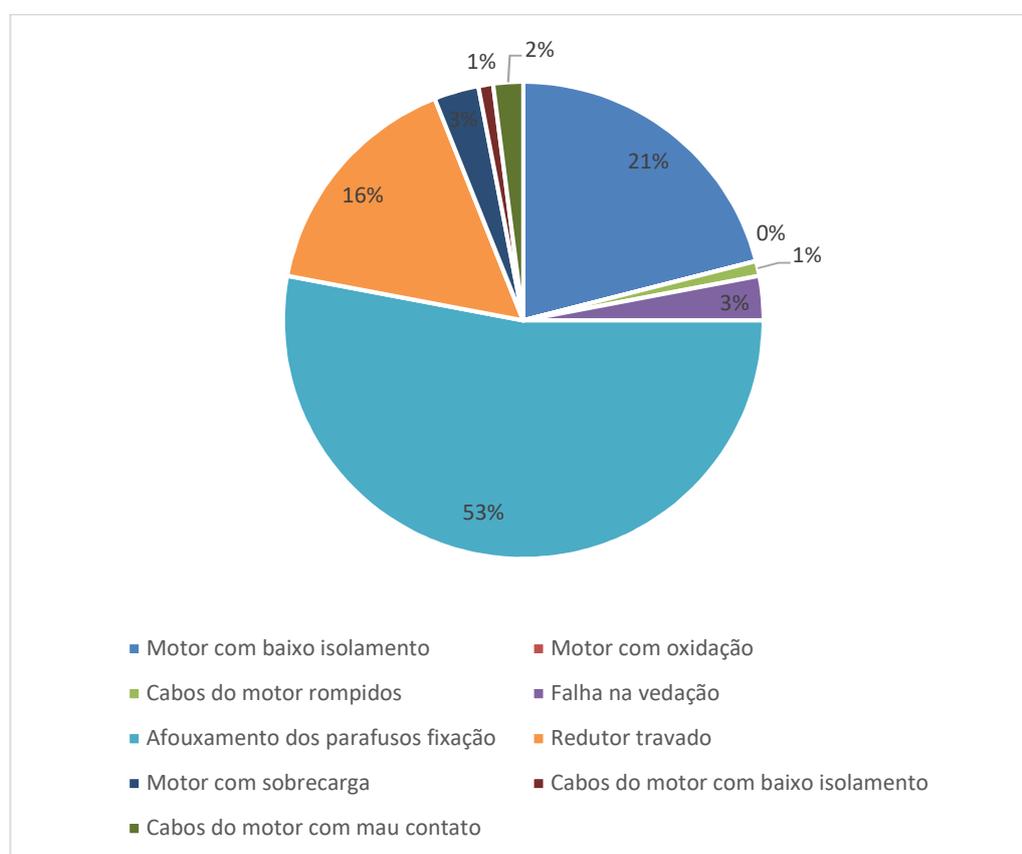
R_i é a confiabilidade do componente;

Ou seja, a confiabilidade do sistema é o produtório da confiabilidade de cada elemento do sistema ligado em uma configuração série. Para que todo o sistema tenha sucesso, todos os elementos do sistema necessitam ter sucesso.

4.6 AVALIAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

Ao considerar um intervalo de análise de 1 ano, ou 8760 horas, e correlacionarmos este período com o modelamento e simulações do comportamento do sistema é possível verificar que os componentes que possuem maior importância para a confiabilidade são os motores elétricos. Conforme explicitado por Reliasoft (2018), para aumento da confiabilidade do sistema, os esforços precisam prioritariamente ser direcionados ao componente que apresenta a menor confiabilidade, sobretudo quando se tratando de um sistema em série.

Figura 4.15 – Distribuição de falha por modo de falha



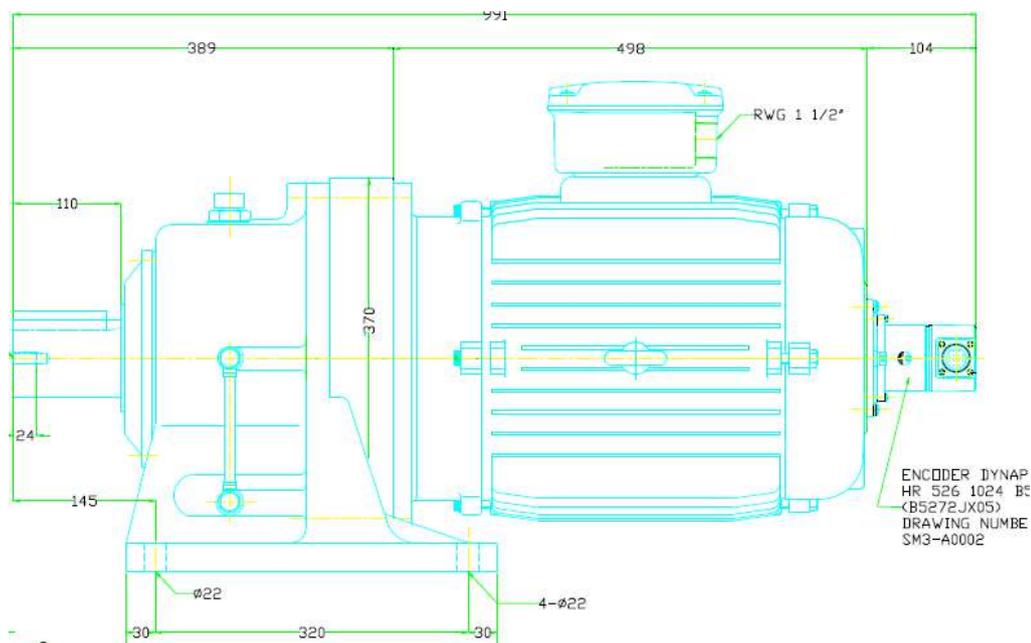
No período analisado, foram registradas 97 falhas atribuídas a especialidade elétrica em direcionadas aos motoredores da mesa de recebimento, sendo identificados diferentes modos de falha para as ocorrências, conforme detalhado no gráfico da figura 4.15. Estes modos de falha serão analisados mais detalhes, de forma que suas causas sejam identificadas, assim como as ações de melhoria para eliminá-los.

4.6.1 Motor com baixo isolamento

Durante operação normal na mesa de recebimento, os motores podem apresentar queda no isolamento para massa. Nas paradas de manutenção preventiva, são realizadas medições de isolamento em seções da mesa, como estas paradas acontecem a uma frequência de 20 em 20 dias aproximadamente, necessitamos de 3 paradas para realizarmos a medição de todos os motores do sistema. Depois de realizada a inspeção nos motores, são sinalizados quais equipamentos apresentaram impedância abaixo do limite mínimo estipulado de 1,044 M Ω , estes motores são retirados de operação na próxima oportunidade e enviados para reparo em oficina.

Com a análise dos motores defeituosos pode-se constatar uma degradação da carcaça dos motores. Este fenômeno pode ser atribuído ao ambiente de exposição dos motores. Mas a pior situação encontrada e o acúmulo de óleo no interior dos motores, proveniente do redutor acoplado ao mesmo, conforme demonstrado na figura 4.16.

Figura 4.16 – Posição de montagem do motoredutor



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2019).

Em função de uma possível passagem de óleo do redutor, o óleo é direcionado para dentro da carcaça do motor através da passagem possível pelo elemento de vedação, que neste caso se trata de um retentor. Possivelmente a passagem foi ocasionada pela pressão interna no momento de funcionamento.

4.6.1.1 Proposta para eliminação da causa: acúmulo de óleo

Em operação, os componentes internos do redutor estão em movimento engrenamento, e que por sua vez, necessitam de lubrificação. Sendo que em todas as paradas de manutenção é realizada a relubrificação dos conjuntos motoredutores. Assim, foram avaliadas três possíveis causas para este acúmulo de água.

- ✓ Há uma deficiência do sistema de selagem do redutor possibilitando a passagem de óleo para o motor;
- ✓ O dreno do motor não é eficiente para retirar todo o óleo que se acumula no motor durante operação;
- ✓ Projeto de dreno do motor inadequado para a aplicação;

- ✓ A passagem de óleo, ocasionada por falha da atividade de lubrificação, ocasionada pelo excesso de óleo no conjunto.

Frente a essas causas algumas modificações no processo de manutenção foram propostas, são elas:

- ✓ Normalização do nível de óleo do reservatório dos redutores;
- ✓ Inspeção e posterior normalização do posicionamento do flange de fixação, se atentando para o posicionamento do dreno de projeto;
- ✓ Criação de recomendações na descrição de manutenção dos motores, informando o correto posicionamento do flange e a importância do cuidado no isolamento do dreno no procedimento de pintura, para que não se inutilize a função do dreno.

Com relação ao nível de óleo dos redutores, foi realizado a conferência e constatado que 45 redutores estavam com nível acima do recomendado, potencializando a possibilidade de passagem de óleo em função do aumento da pressão interna no conjunto durante seu funcionamento. Foi programado a normalização e está em acompanhamento até o momento.

Com relação ao posicionamento do flange, foi realizada a inspeção e identificado 23 motores com anormalidade, pois há possibilidade de montagem em diversas posições, visto que os 4 furos são simétricos. E identificado que 7 motores não possuem furos de drenos instalados nas tampas conforme projeto original. Todos os desvios foram planilhados e estão sendo normalizados nas futuras intervenções de manutenção.

Foi criado um procedimento de recomendações para orientação do processo de manutenção dos motores, junto a unidade reparadora.

4.6.2 Afrouxamento dos parafusos de fixação

O segundo modo de falha predominante nos motores da mesa de recebimento é o afrouxamento dos parafusos de da carcaça do motor ao flange e tampa traseira, causado principalmente por falta de controle do momento de aperto dos parafusos e pela vibração excessiva inerente causada durante o atravessamento das placas na mesa.

Realizado uma consulta junto ao fabricante para levantamento das informações técnicas dos parafusos de projeto e recomendações a serem aplicadas no procedimento de manutenção e inspeção dos motores.

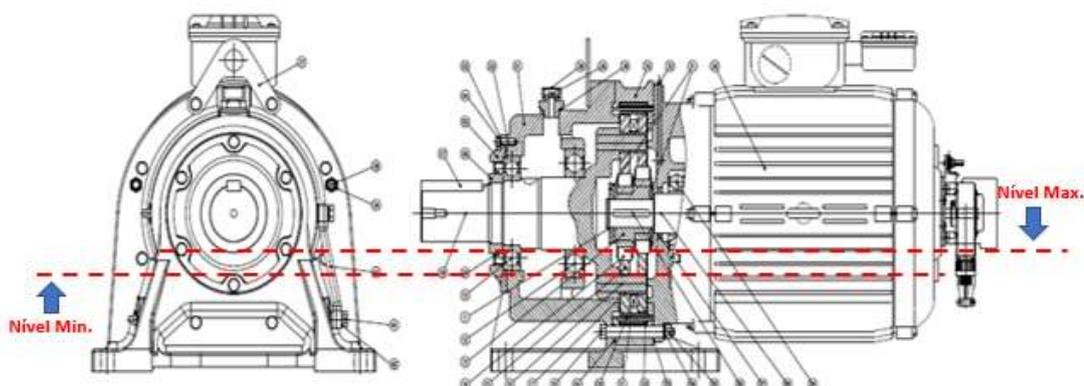
4.6.2.1 Proposta para eliminação da causa

Com as informações técnicas dos parafusos, foi criado um plano de acompanhamento do momento de aperto dos conjuntos. O plano é realizado pelos próprios eletricitistas que realizam a medição de isolamento dos motores. Conforme periodicidade do plano a cada 3 intervenções de manutenção é realizado a conferência do torque de todos os conjuntos montados. Para execução da atividade, foi incluída a necessidade de utilização de ferramental adequado para controle do momento de aperto “torque” conforme recomendação do fabricante.

4.6.3 Travamento do redutor

O terceiro modo de falha predominante nos motoredutores da mesa de recebimento é travamento dos redutores, causado principalmente por falta de controle do nível do óleo de lubrificação dos conjuntos, conforme figura 4.17. Durante a inspeção dos conjuntos foi identificado que 27 motoredutores estão com nível de óleo abaixo do mínimo recomendado.

Figura 4.17 – Controle de nível do óleo do motoredutor



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2019).

4.6.3.1 Proposta para eliminação da causa

Foi revisado o plano de lubrificação contemplando as informações de controle do nível de óleo dos motoredutores e a conferência da especificação técnica do óleo de lubrificação recomendado.

Durante a manutenção do motor, será orientado a importância de garantia do modelo do retentor de vedação, que para esta aplicação deve ser o retentor com mola. Conforme projeto original do motor.

4.6.4 Quebra do acoplamento

O quarto modo de falha predominante na mesa de recebimento é a quebra do acoplamento rígido, causado principalmente por fadiga dos componentes (gaiola, engrenamento dos cubos, capa e parafusos de fixação) em função dos desgastes e pela vibração excessiva inerente causada durante o atravessamento das placas na mesa.

4.6.4.1 Proposta para eliminação da causa

Há em andamento um projeto de troca do modelo do acoplamento que atualmente é rígido por um modelo que permite uma maior absorção de impactos, causa muito comum no processo de enformamento, pois algumas placas apresentam empenos provenientes do processo de resfriamento nos pátios de armazenamento. Conforme já constatado na área a vida útil do novo modelo de acoplamento, neste caso flexível e demonstrado pela figura 4.18, apresentou uma melhor performance para o processo de enformamento. Assim está sendo dado a continuidade de troca dos acoplamentos ao longo da mesa, atualmente temos

Figura 4.18 – Novo modelo de acoplamento flexível



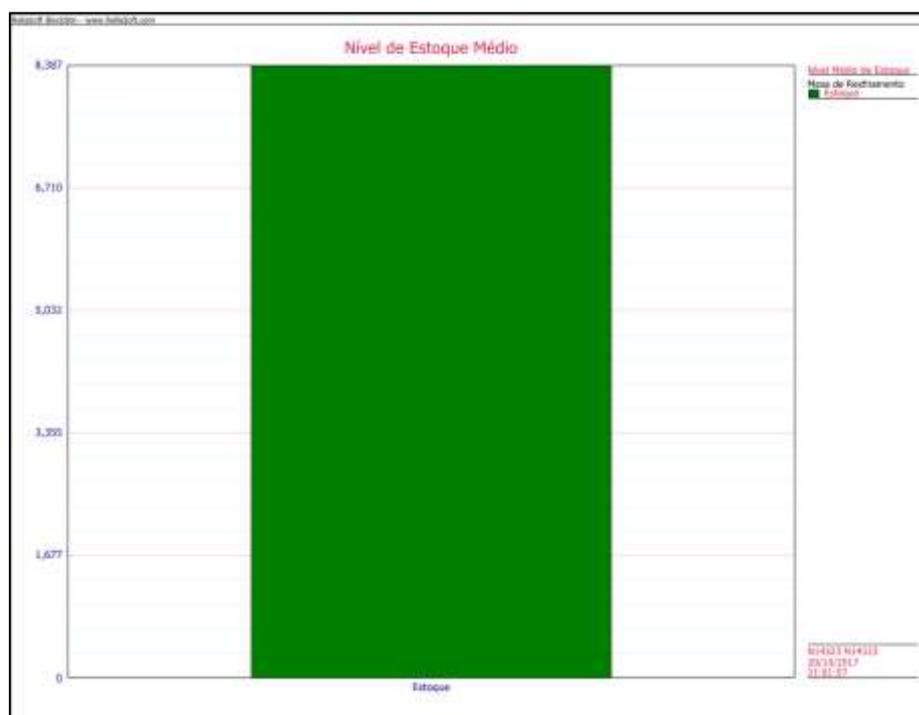
Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2019).

O projeto do novo acoplamento que está sendo implantado possui o elemento central em poliuretano que tem a função de absorver as cargas cíclicas geradas pelo impacto das superfícies das placas de aço nos rolos durante o atravessamento na mesa de recebimento.

4.7 DIMENSIONAMENTO DE ESTOQUE

Utilizando o software BlockSim® é possível realizar o modelamento do estoque de sobressalentes necessário para garantir a disponibilidade de equipamentos no contexto do sistema modelado. Através desse recurso, o software foi parametrizado para modelar o comportamento do estoque de sobressalentes da mesa de recebimento. O resultado desta simulação foi um estoque médio de 8 motores, conforme mostrado na figura 4.19, o que se mostrou próximo da realidade para o sistema, que é de 10 motores, sobretudo indicando uma otimização de estoque de 20%.

Figura 4.19 – Nível de estoque médio de motores da mesa de recebimento



Fonte: O autor (2019)

Embora o software permita a parametrização de diferentes aspectos, apenas alguns parâmetros foram considerados para o modelamento de estoque da mesa de resfriamento, pois nem todos possuem dados históricos de qualidade ou possuem grande interferência com o processo. O nível inicial de estoque considerado foi de 10 motores, prática em execução pela área de manutenção, o limite mínimo para

resuprimento é de 3 motores, ao ser atingido um pedido de 10 motores deve ser realizado, considerando que o *lead time* – tempo entre o pedido e fornecimento do sobressalente, considerando transporte – para os motores da mesa de recebimento é de aproximadamente 120 dias.

Também foi parametrizado um estoque de emergência, conforme realidade da área, que corresponde a 3 motores armazenados em um local próximo ao equipamento, para reduzir o tempo gasto na mobilização do sobressalente em caso de necessidade de substituição emergencial.

4.8 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordada as formas e dificuldades encontradas na aquisição dos dados históricos de falhas nos equipamentos das mesas de recebimento, explicitando os diferentes meios e métodos utilizados para obtenção dos dados. Também foi mostrado as premissas adotadas para a parametrização dos softwares Weibull© e BlockSim©, de forma a representar o sistema de resfriamento de bobinas como um modelo confiável para a realização de análises quantitativas de confiabilidades.

Da análise do modelamento do sistema foram identificados os equipamentos e modos de falhas de maior impacto na confiabilidade e propostas ações de melhoria nos projetos para redução de ocorrências destes, em conjunto com a equipe de engenharia de equipamentos.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados do trabalho e os métodos que foram elaborados para que estes possam ser mensurados. Serão abordados também os ganhos não mensuráveis obtidos pelo trabalho.

5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Para desenvolvimento do trabalho, os dados históricos de falha foram coletados de diferentes sistemas, desenvolvidos para diferentes perfis de usuário, isso aumenta a complexidade na aquisição dos dados e a qualidade da informação final, pois cada usuário registra o evento conforme sua profundidade de conhecimento, gerando informações muitas vezes desconexas e causando má interpretação dos dados.

Mostrou-se latente a necessidade de um sistema robusto o suficiente para o registro dos eventos com a qualidade necessária para contribuir com as análises quantitativas de confiabilidade sem desprendimento de energia adicional para compilação de um banco de dados rico em informações e com estas corretamente registradas.

Neste ponto, está sendo implantado um novo CMMS, baseado na plataforma SAP e seguindo um programa interno corporativo denominado *Asset Reliability Management Program (ARMP)*, desenvolvido para padronizar práticas da Gestão de Ativos a nível corporativo, nas plantas do grupo espalhadas por diferentes países. Toda a árvore de equipamentos, modelo de apropriação de recursos e custos, metodologia de bloqueio de energia e padronização de atividades, foram migradas para os padrões propostos pelo ARMP. A revisão e adequação da árvore de equipamentos no CMMS a ser implantado, por si só, já melhora a capacidade de registro de eventos em um componente específico, facilitando a aquisição dos dados a nível de componente, e permitindo o detalhamento dos eventos a nível de modo de falha e causas.

5.2 CULTURA DA CONFIABILIDADE

Neste aspecto, o trabalho se mostrou importante para fomentar a cultura da confiabilidade entre os empregados envolvidos com a Gestão de Ativos da empresa. Ao realizar abordagens quantitativas para os diferentes sistemas, e mais importante, quando essas abordagens probabilísticas e simuladas, representam o comportamento dos equipamentos em operação, os indivíduos envolvidos no processo passam a perceber a importância da confiabilidade e acreditam nas novas estratégias decorrentes das análises.

A confiança da equipe técnica na estratégia de manutenção embasada em uma metodologia de confiabilidade é de extrema importância, pois estes indivíduos irão desenvolver as atividades na prática e o resultado final é dependente da qualidade com que estas ações serão executadas.

Ao final do estudo foi possível constatar o comprometimento da equipe em colocar em prática as melhorias e colher os resultados dos testes nos equipamentos instalados, com intuito de confirmar o resultado simulado na prática.

5.3 IMPLANTAÇÃO DAS MELHORIAS NOS EQUIPAMENTOS

Com o objetivo de concentrar recursos e obter ganhos em curto prazo e com investimento relativamente baixo, se comparado a outros equipamentos da planta, as ações de melhoria nos equipamentos da mesa de recebimento foram focadas no componente com a maior importância para a confiabilidade neste sistema, o conjunto motoredutor, e nos modos de falha com maior impacto na confiabilidade deste.

- ✓ Afrouxamento dos parafusos de fixação;
- ✓ Motor com baixo isolamento;
- ✓ Travamento do redutor;
- ✓ Quebra do acoplamento.

A estratégia de manutenção nos equipamentos da mesa de recebimento foi objeto de análise de RCM qualitativo para a revisão de planos há poucos meses antes deste estudo, desta forma os novos criados planos de manutenção e inspeção foram levados em consideração para a verificação da eficácia das melhorias, em termos de frequência das ações.

As paradas preventivas para manutenção da mesa de recebimento são realizadas na mesma ocasião de parada do Laminador de Tiras a Quente, sendo que ocorrem em média a cada 20 dias. Considerando este intervalo, para calcularmos a frequência em dias para a realização das inspeções nas paradas, a frequência base deve ser multiplicada por 20. Ou seja, a inspeção preditiva de isolamento e reaperto dos parafusos de fixação do flange e tampa nos motores é realizada em média com frequência de 60 dias, sendo que uma inspeção sensitiva é realizada semanalmente e esta pode ser gatilho para uma inspeção corretiva extraordinária. Para as relubrificações dos conjuntos motoredutores, foi realizado a adequação de todos os níveis e está sendo controlado nas ocasiões de manutenções de parada do Laminador de Tiras a Quente, da mesma forma, uma inspeção sensitiva é realizada semanalmente e esta pode ser gatilho para uma intervenção preventiva extraordinária.

5.4 RESULTADOS

Após a implantação das melhorias em todos os motores da mesa de recebimento, espera-se uma redução de 65% nas falhas em motores elétricos. Uma vez que estas falhas correspondem a 53% do tempo de parada imprevista de produção da mesa de recebimento atribuída as especialidades mecânica e elétrica, podemos calcular o ganho esperado da forma mostrada na tabela da tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Memorial de cálculo dos ganhos esperados

Perda de produção		
Período observado	12	mês
Paradas imprevistas/ ano	11,61	hora
Paradas imprevistas elétricas/ano	8,61	hora
Ganho esperado (meta 65%)	5,60	hora
Produtividade média	704	ton/hora
Ganho de produção / ano	3.942,4	tons
Perda financeira		
Margem de contribuição (bobinas de aço)	180	U\$/ton (ref: 02/2019)
Perda financeira / ano	709.632,0	U\$

Fonte: O autor (2019)

Algumas premissas foram utilizadas para simplificação da projeção de ganhos:

- ✓ O percentual de redução de quantidade de falhas também corresponde em mesma proporção para a quantidade de tempo de paradas imprevistas;
- ✓ Considerado um valor médio de reparo de motores, independente do escopo a ser realizado em cada reparo e que a redução de 65% no número de falhas também terá um efeito de mesma proporção nos custos de reparo.

Da projeção de ganhos por custo evitado decorrente da redução de falhas em motores podemos considerar:

- ✓ A redução da taxa de falha, além de contribuir para a garantia de cumprimento da meta de UMSR, traz ganhos em custos variáveis, por evitar paradas imprevistas para manutenção e aumentar a disponibilidade do equipamento para a produção, e um custo fixo, por reduzir os gastos com reparos externos em motores, emergenciais ou não, assim como do custo desprendido para a substituição de motores defeituosos.

Com relação aos ganhos não mensuráveis do estudo, podemos citar:

- ✓ Maior conhecimento das equipes de manutenção com a estratégia de manutenção baseada em estudos quantitativos;
- ✓ Maior compreensão das funcionalidades de cada componente que faz parte dos equipamentos;
- ✓ Aumento da satisfação dos empregados ao visualizarem a estabilidade e o aumento de produtividade do Laminador;
- ✓ Melhora de informações técnicas inseridas para orientação dos futuros reparos dos motores.

O desempenho do sistema recebimento será acompanhado de forma contínua, a fim de se obter os melhores resultados reais das ações propostas e embasadas por simulação. Com o alcance de um novo patamar de desempenho, ao longo do tempo, poderão ocorrer modos de falhas que não foram previstos durante os estudos de confiabilidade qualitativos e quantitativos. Estes casos deverão ser analisados e incluídos nos estudos de RCM, para que se consolide como uma ferramenta viva de revisão e ajuste da estratégia de manutenção.

REFERÊNCIAS

DEKKER, R. **Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis**. Reliability Engineering and System Safety, v. 51, p. 229–240, 1996.

PRIMETALS. **Laminador de Tiras Á Quente**: Primetas Technologies. Disponível em: <<https://www.primetals.com/pt/portfolio/hot-rolling-flat/laminador-de-tiras-a-quente/>>. Acesso em: 01 Agosto. 2019.

RELIASOFT. **Maintenability analysis**: Analyze Maintainability of complex systems. Disponível em: <http://www.reliasoft.com/BlockSim/maintainability_analysis.htm>. Acesso em: 15 Agosto. 2019.

RELIASOFT. **Reliability Importance**. Disponível em: <http://www.reliawiki.org/index.php/Reliability_Importance>. Acesso em: 25 Agosto. 2019.

Leemis, L.M., **Reliability**: Probabilistic Models and Statistical Methods. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.

KÖCHE, José Carlos. **Fundamentos de metodologia científica**: teoria da ciência e prática da pesquisa. 14. ed. rev. amp. Petrópolis, RJ: Vozes, 1997.

KOCH, Richard. **O Princípio80/20**: O segredo de se realizar mais com menos. 1 ed. Rio de Janeiro: Rocco, 2000. 261 p.

MARCORIN, A. J.; ABACKERLI, A. J. **Estudo exploratório sobre áreas potenciais de aplicação de técnicas de confiabilidade**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXI, 2001, Salvador. Anais...Porto Alegre: ABEPRO, 2001, 1 CD-ROM.

NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. Reliability centered maintenance. **National Technical Information Service**, EUA, Report n.AD/A066-579, 1978.

GUTIÉRREZ, A. M. **Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios**: enfoque sistémico kantiano. 1ª. ed. Colômbia: AMG, 2005.

BARAN, Leandro Roberto. **Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada na Redução de Falhas**: um estudo de caso. 2011. 102 fls. Monografia (Especialização em Gestão Industrial: Produção e Manutenção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2011.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**: second edition. 2ª. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

SIQUEIRA, Y. P. D. S. **Manutenção centrada na confiabilidade**: manual de implantação. 1ª (Reimpressão). ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade: terminologia. Rio de Janeiro, 1994.

HEADQUARTERS. **Failure Modes, Effects and Criticality Analyses (FMECA) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities**. Technical Manual (TM 5-698-4). Department of the Army. Washington, DC, 2006.

BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. **Mathematical Theory of Reliability**. Society for Industrial and Applied Mathematics, EUA, 1996.

MORTELARI, Denis; SIQUEIRA, Kleber; PIZZATI, Nei. **O RCM na Quarta Geração da Manutenção: A Moderna Gestão de Ativos**. São Paulo: RG Editores, 2014.

SILVA, Caetano N. da. **Controle da Temperatura de Bobinamento**. Treinamento interno. ArcelorMittal Tubarão. Serra, 2011.

SMS DEMAG. **Manual de manutenção e operação: Laminador de Acabamento**. 2000.

VAI UK. **Manual de manutenção e operação: Laminador Desbastador**. 2000.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4 ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.

ARCELOMITTAL BRASIL. **ArcelorMittal**. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com.br/>>. Acesso em: 28 out. 2019.