

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

VINÍCIUS DETEMANN MUNIZ

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE
E RESFRIAMENTO DE BOBINAS DE AÇO LAMINADAS A QUENTE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**VITÓRIA
2017**

VINÍCIUS DETEMANN MUNIZ

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE
E RESFRIAMENTO DE BOBINAS DE AÇO LAMINADAS 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

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE E RESFRIAMENTO DE BOBINAS DE AÇO LAMINADAS A QUENTE

por

VINÍCIUS DETEMANN MUNIZ

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

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Professor Orientador - UTFPR

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

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

Dedico este trabalho à minha família pelo tempo ausente e à minha esposa Lais de Souza Schiavo pelo apoio e suporte durante este período.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo estimado suporte durante todas as etapas da minha vida.

À minha esposa pelo companheirismo e motivação para seguir em frente.

Aos meus colegas de trabalho da ArcelorMittal Tubarão pelo apoio e participação ativa no desenvolvimento do trabalho. Em principal ao Eng. Welington Soares pelo suporte técnico nos equipamentos da mesa de resfriamento.

Ao meu professor orientador Dr. Marcelo Rodrigues, por todos direcionamentos, sugestões e críticas.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente apoiaram a realização deste trabalho.

Nem tudo que pode ser contado conta, e nem tudo que conta pode ser contado. (CAMERON, Bruce William, 1963)

RESUMO

MUNIZ, Vinícius Detemann. **Análise de confiabilidade de um sistema de transporte e resfriamento de bobinas de aço laminadas a quente**. 2017. 96 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O Laminador de Tiras a Quente realiza a transformação do aço conformado como placa em bobinas, através de um processo de laminação, após aquecimento da placa de aço a temperaturas médias de 1200°C. Uma vez atingindo a temperatura ideal as placas são transportadas para os laminadores, onde passam por entre cilindros de ferro fundido, em sucessivos passes para redução da espessura do material. Em sequência, a tira de aço resultante deste processo recebe jatos d'água laminares para resfriamento controlado em um equipamento chamado mesa de resfriamento. Neste trabalho será realizado o modelamento do sistema de resfriamento de um Laminador de Tiras a Quente para 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.

Este sistema foi escolhido para desenvolvimento do trabalho pelo potencial de impacto na produtividade e qualidade das bobinas produzidas no laminador, e por possuir, dentre os demais sistemas, a maior quantidade de componentes iguais trabalhando em série. Isso permite, através de uma análise concentrada de um subsistema, aqui chamado unidade de acionamento, o modelamento de todo o sistema de resfriamento laminar.

O desenvolvimento do trabalho será suportado pela metodologia da engenharia da confiabilidade, ferramentas de software específicas para tratamento de dados históricos de falhas dos subsistemas e componentes e experiência dos colaboradores que atuam neste processo.

Embasadas pela análise quantitativa de confiabilidade serão propostas melhorias específicas em alguns componentes do sistema para a redução, ou até mesmo eliminação, dos principais modos de falhas identificados e sobretudo, a análise quantitativa realizada contribuiu para a quebra de paradigmas na manutenção dos sistemas e eliminação de desperdícios na aplicação dos recursos e materiais disponíveis, convergindo para o incremento no controle de custos de manutenção e aquisição de sobressalentes.

Palavras-chave: Resfriamento. Bobinas de aço. Laminação a Quente. Manutenção Centrada na Confiabilidade. Siderurgia.

ABSTRACT

MUNIZ, Vinícius Detemann. **Reliability analysis of a cooling and transfer system for hot-rolled steel coils.** 2017. 96 pages. Monograph (Specialization in Reliability Engineering) - Federal Technical University of Paraná. Curitiba, 2017.

The hot strip mill transforms the steel plates into strips through a lamination process, when the steel plates are heated to average temperatures of 1200°C. Once the ideal temperature is reached, the plates are transferred to the mills, where the plates pass through cast iron cylinders. The process is repeated so the thickness of the material is successively reduced. After that, the steel strip is cooled down in a controlled process in the cooling table, where it is striked with water in a laminar flow.

This study proposes the modeling of a cooling system for a hot strip mill in order 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.

This system was elected for this study due to the direct impact it has on the productivity and quality of the coils produced in the mill, and also because it has, among the other systems, the largest quantity of equal components working in series. This allows, through the concentrated analysis of a subsystem, here called drive unit, the modeling of the entire laminar cooling system.

The development of the study is based on the Reliability-Centered Maintenance Methodology, using software tools for handling historical data of subsystem failures and components and also the experience of employees who work in the coil cooling and transfer process.

Based on the quantitative reliability analysis, specific improvements will be proposed in some components of the system for the reduction or even elimination of the main identified failure modes, and above all, the quantitative analysis performed points out to a mindset change in maintenance managing and waste reduction in the employment of the available resources and materials, improving cost control for maintenance and spare parts acquisition.

Keywords: Cooling. Steel coils. Hot rolling. Reliability-Centered Maintenance. Steelmaking.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Evolução da produção de aço por país.....	15
Figura 1.2 - Evolução mensal da produção mundial de aço de 2016 a 2017.....	16
Figura 1.3 - Evolução da produção anual de aço bruto no Brasil.....	17
Figura 2.1 - Layout geral do Laminador de Tiras a Quente.....	24
Figura 2.2 - Vista lateral em corte de um Laminador Vertical.....	27
Fotografia 2.3 - Laminador Vertical e laminador Desbastador.....	28
Fotografia 2.4 - Detalhe de um <i>Coilbox</i>	29
Figura 2.5 - Detalhes de diferentes tipos de pontas de esboço após laminação.....	30
Fotografia 2.6 - Detalhe de uma cadeira de um Trem Acabador.....	32
Figura 2.7 - Detalhe de um conjunto típico de transporte de tiras.....	34
Fotografia 2.8 - Vista geral de um sistema de resfriamento de bobinas.....	35
Fotografia 2.9 - Vista frontal de uma bobinadeira em operação.....	37
Figura 3.1 - Curva da Banheira.....	41
Figura 3.2 - Padrões de falha.....	41
Figura 4.1 - Fluxo de aquisição de dados históricos.....	48
Figura 4.2 - Pareto de distribuição de falhas por modo de falha.....	51
Figura 4.3 - Distribuição do tempo de parada por equipamento.....	52
Figura 4.4 - Diagrama de blocos de confiabilidade da unidade de acionamento.....	53
Figura 4.5 - <i>Heat map</i> de falhas em motores do sistema.....	54
Figura 4.6 - Gráficos de contorno para motores de diferentes seções.....	55
Figura 4.7 - Gráficos de contorno para motores próximos aos chuveiros <i>cross spray</i>	56
Figura 4.8 - Curva Confiabilidade x Tempo para motores da mesa de resfriamento.....	57
Figura 4.9 - Função Densidade de Probabilidade de motores da mesa de resfriamento.....	58
Tabela 4.3 - Parâmetros de confiabilidade dos rolos da mesa de resfriamento.....	59
Figura 4.10 – Curva Confiabilidade x Tempo dos rolos da mesa de resfriamento.....	59
Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade dos rolos da mesa de resfriamento.....	60
Figura 4.12 - Curva Confiabilidade x Tempo para acoplamentos da mesa de resfriamento.....	61
Figura 4.13 - Função Densidade de Probabilidade dos acoplamentos da mesa de resfriamento.....	62
Figura 4.14 - Curva Confiabilidade x Tempo para guardas laterais da mesa de resfriamento.....	63
Figura 4.15 - Função Densidade de Probabilidade das guardas laterais da mesa de resfriamento.....	64
Figura 4.16 - Curva Confiabilidade x Tempo para a unidade de acionamento da mesa de resfriamento.....	66
Figura 4.17 - Importância da confiabilidade para a unidade de acionamento.....	67

Figura 4.18 - Diagrama de blocos de confiabilidade do sistema de resfriamento.	68
Figura 4.19 - Curva Confiabilidade x Tempo para o sistema de resfriamento	68
Figura 4.20 - Distribuição de falha por modo de falha.....	71
Fotografia 4.21 - Mesa de resfriamento com os chuveiros ligados	72
Fotografia 4.22 - Motor durante reparo, processo de pintura e rebobinamento.	74
Figura 4.23 - Detalhe de configuração de um selo W3 Seal.	75
Figura 4.24 - Novo modelo de dreno proposto.	76
Figura 4.25 – Detalhe de montagem do modelo de rolamento classe 63 proposto...	78
Figura 4.26 - Nível de estoque médio de motores da mesa de resfriamento.	79
Figura 5.1 - Detalhe de furo para inspeção do rolamento.	84
Figura 5.2 - Rolamento com marcações coloridas para inspeção.....	85
Figura 5.3 - Exemplo de preenchimento de tabela para registro de inspeção.....	85
Figura 5.4 - Memorial de cálculo dos ganhos esperados.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Perdas de produção e financeiras por ano.....	52
Tabela 4.2 - Dados técnicos dos motores.	54
Tabela 4.3 - Parâmetros de confiabilidade de motores da mesa de resfriamento.....	57
Tabela 4.4 - Parâmetros de confiabilidade dos acoplamentos da mesa de resfriamento.	61
Tabela 4.5 - Parâmetros de confiabilidade das guardas laterais da mesa de resfriamento.	63
Tabela 4.6 - Parâmetros de confiabilidade do sistema de resfriamento.....	70
Tabela 5.1 - Estratégia de inspeção da mesa de resfriamento.	83
Tabela A1.1 - Relatório de simulação Weibull para motores.....	92
Tabela A1.3 - Dados de falhas em mancais dos rolos da mesa de resfriamento.....	95
Tabela A1.4 - Dados de falhas em guardas laterais da mesa de resfriamento.	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	O MERCADO MUNDIAL DE AÇO.....	14
1.2	O MERCADO DE AÇO NO BRASIL.....	16
1.3	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.4	OBJETIVOS	19
1.4.1	Objetivo Geral.....	19
1.4.2	Objetivos Específicos	19
1.5	JUSTIFICATIVA	20
1.6	METODOLOGIA DE PESQUISA APLICADA	21
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	ÁREA DE APLICAÇÃO	23
2.1	O LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE.....	23
2.1.1	Fornos de Reaquecimento de placas	25
2.1.2	Laminador Desbastador	26
2.1.3	Coilbox	29
2.1.4	Tesoura de pontas.....	30
2.1.5	Trem Acabador.....	31
2.1.6	Mesa de Resfriamento	32
2.1.7	Controle de temperatura.....	33
2.1.8	Equipamentos da mesa de resfriamento	33
2.1.9	Bobinadeiras.....	36
2.2	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	37
3	CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE.....	39
3.1	CONFIABILIDADE.....	39
3.2	CONCEITOS DE FALHA.....	39
3.2.1	Falha Funcional	40
3.2.2	Mecanismos de falha.....	40
3.2.3	Modos de falha	42
3.3	CONCEITOS DE DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE	43
3.3.1	Disponibilidade	43
3.3.2	Mantenabilidade	44
3.3.3	Importância da confiabilidade no tempo	44
3.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	45
4	DESENVOLVIMENTO	46
4.1	PREMISSAS PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	46
4.2	AQUISIÇÃO DE DADOS HISTÓRICOS DE FALHAS	47
4.2.1	SISMANA (CMMS)	48
4.2.2	AP – Acompanhamento da Produção do LTQ.....	49
4.2.3	SGT – Sistema de Gestão de Turno	50
4.3	RESULTADOS HISTÓRICOS OBTIDOS	50

4.4	MODELAMENTO DO SISTEMA	53
4.4.1	Falha em motores elétricos	53
4.4.2	Falha em rolos.....	58
4.4.3	Falha em acoplamentos	60
4.4.4	Falha em guardas laterais	62
4.5	SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA	64
4.5.1	Configuração do contexto operacional	65
4.5.2	Modelamento e simulação da unidade de acionamento	65
4.5.3	Modelamento e simulação da unidade de acionamento.....	67
4.6	AVALIAÇÃO DOS MODOS DE FALHA	71
4.6.1	Motor com baixo isolamento.....	73
4.6.1.1	Proposta para eliminação da causa: água nos fundos de ranhura.....	73
4.6.1.2	Proposta para eliminação da causa: acúmulo de água no motor	74
4.6.2	Motor travado	77
4.6.2.1	Proposta para eliminação da causa	77
4.7	DIMENSIONAMENTO DE ESTOQUE	78
4.8	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	80
5	CONCLUSÃO	81
5.1	AQUISIÇÃO DE DADOS	81
5.2	CULTURA DA CONFIABILIDADE	82
5.3	IMPLANTAÇÃO DAS MELHORIAS NOS EQUIPAMENTOS	82
5.4	RESULTADOS	85
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	APÊNDICE A – DADOS DE FALHAS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	91

1 INTRODUÇÃO

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 supracitados. Ainda mais importante quando consideramos o crescimento da automação industrial, que de acordo com Dekker (1996), impulsionou 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 motivadores do trabalho, as premissas e metodologias utilizadas para a obtenção do resultado desejado.

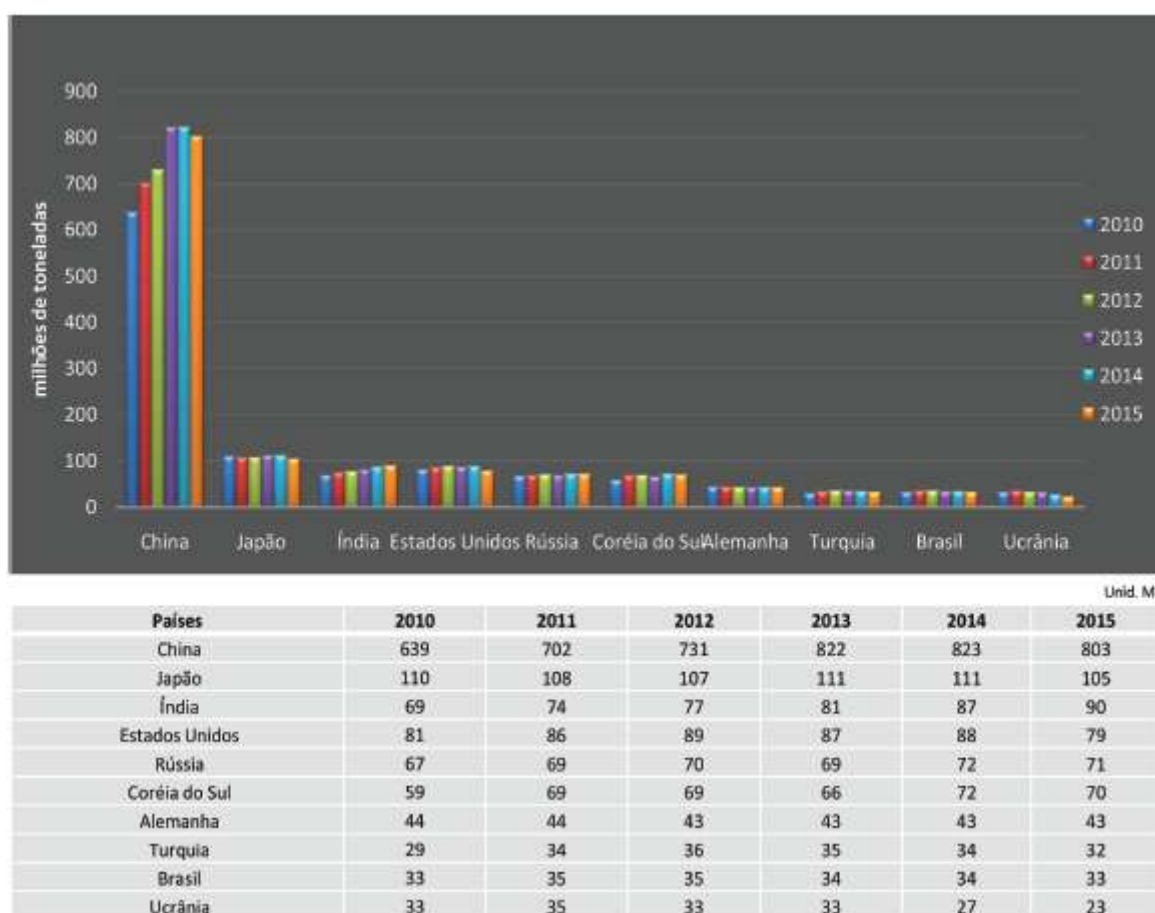
1.1 O MERCADO MUNDIAL DE AÇO

De acordo com dados da *WorldSteel Association* – Associação representante de indústrias produtoras de aço -, que representa mais de 160 produtores de aço, o que corresponde em torno de 85% da produção mundial de aço, o setor de produção de aço faz circular cerca de US\$ 900 bilhões por ano e é um importante indicador da saúde econômica mundial. Este setor sofreu um forte impacto com a crise econômica mundial e viu a demanda por aço cair drasticamente. Os mercados emergentes, como Brasil, Rússia e Índia, ainda não tiveram uma recuperação total da economia e retomada do crescimento.

Diversos investimentos nas áreas de infraestruturas foram interrompidos ou até mesmo cancelados, isso causou um desequilíbrio entre a capacidade de

produção de aço e a demanda pelo produto, impactando nos preços de venda do material e acirrando ainda mais a competição entre as indústrias produtoras. Sendo que a China, país que há dez anos era um grande mercado para as siderúrgicas ocidentais, tornou-se o maior produtor mundial de aço, detentora de mais de 50% da produção mundial e com capacidade instalada para atender 75% da demanda mundial de aço, conforme mostrado na figura 1.1, com um elevado excedente de capacidade instalada, capaz de desestabilizar o mercado mundial de produtos siderúrgicos. Apenas o excedente da produção de aço Chinês corresponde a produção total do Japão, segundo maior produtor de aço do mundo (SICETEL, 2016).

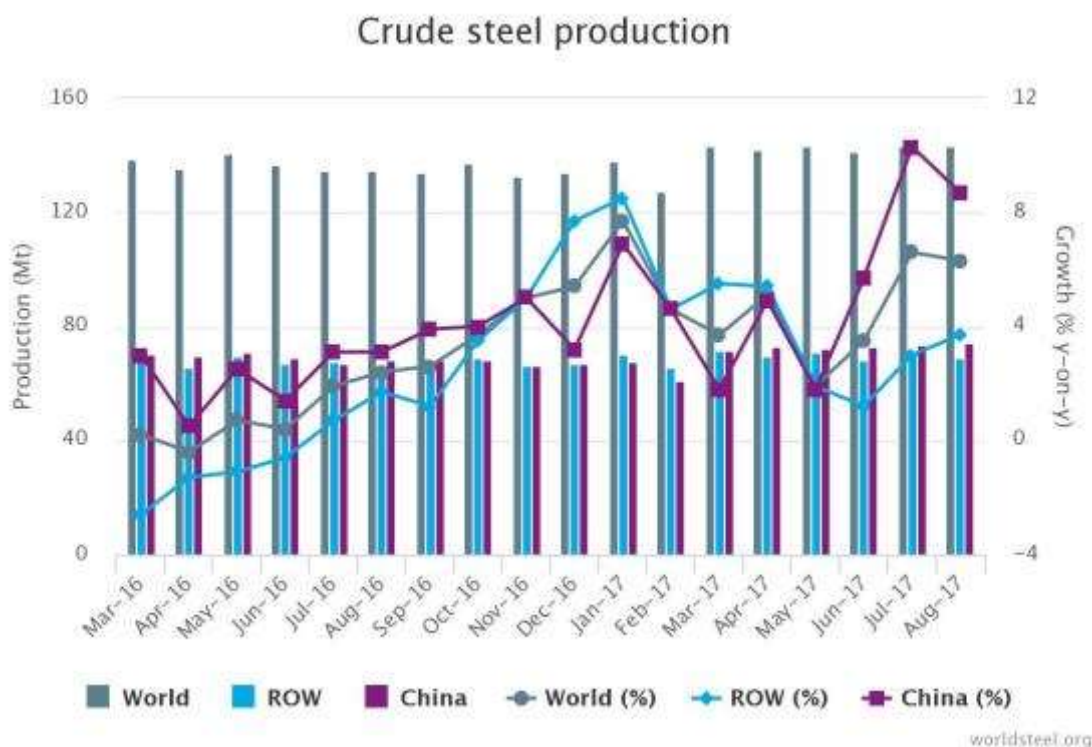
Figura 1.1 - Evolução da produção de aço por país



Fonte: Relatório de análise anual do Mercado do aço SICETEL, 2016.

Para o ano de 2017 a projeção de crescimento da demanda por aço está maior do que a previsão anteriormente feita para todo o ano. Este crescimento está atrelado à recuperação das economias de importantes mercados, tais como Índia, Rússia e Brasil.

Figura 1.2 - Evolução mensal da produção mundial de aço de 2016 a 2017.



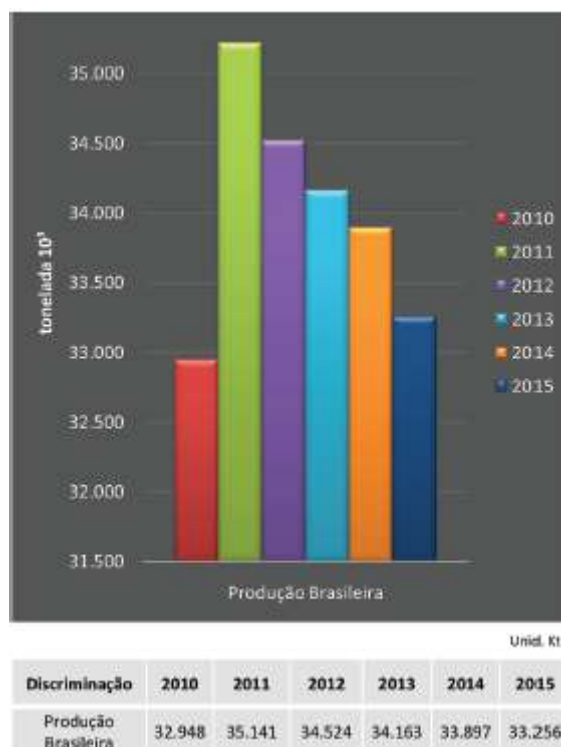
Fonte: WorldSteel Association (2017).

A expansão da demanda deverá ser em torno de 1,3% para o ano de 2017, atingindo 1,535 bilhão de toneladas, e 0,9% em 2018, alcançando 1,549 bilhão de toneladas, acompanhando esta demanda, a produção de aço está sendo retomada e a capacidade produtiva ociosa vem sendo gradativamente utilizada, como demonstra a figura 1.2. (WORLDSTEEL, 2017)

1.2 O MERCADO DE AÇO NO BRASIL

Desde o auge da crise econômica o mercado doméstico de aço não recuperou os patamares de 2008, como podemos observar na figura 1.3, o consumo aparente de aço no Brasil, em 2015, caiu 17% em relação ao ano anterior, em 2016 mais 9% e para 2017 a projeção é de recuperação, porém ainda tímida em relação à retração sofrida nos anos anteriores. Em 2015, a siderurgia brasileira trabalhou com menos de 70% de ocupação da capacidade instalada e nos primeiros meses de 2016 a ocupação está abaixo dos 60%.

Figura 1.3 - Evolução da produção anual de aço bruto no Brasil.



Fonte: IABr - Instituto Aço Brasil, estatísticas de desempenho.

Em 2015, o Brasil exportou 40% mais do que o exportado em 2014 e deverá aumentar mais 30% em 2016, resultado da melhoria nos processos e aumento da competitividade da indústria brasileira, proporcionada pela forte desvalorização cambial do ano passado. A forte crise econômica que o País atravessa provocou elevada queda da atividade econômica nos anos e de investimentos, e o ajuste fiscal que está sendo proposto vai, no curto prazo, reduzir o consumo e aumentar o desemprego. Ou seja, vai piorar antes de começar a melhorar, e o crescimento do consumo interno, quando começar a melhorar, será de forma lenta e gradual (SICETEL, 2016).

A indústria brasileira de aço tem visualizado o mercado externo como uma solução a curto prazo para contornar o fraco desempenho do mercado doméstico, devido a recessão econômica nos últimos anos, porém atualmente, o mercado mundial tem capacidade ociosa quase a totalidade dos produtos industrializados. Não existe nenhum mercado carente de fornecedores, ávidos por comprar produtos brasileiros. Assim, o aumento da inserção do produto brasileiro estará deslocando outro fornecedor e isto só será possível com o aumento da competitividade da indústria brasileira frente aos demais produtores de outros países. Para este desafio,

a estabilidade operacional, suportada pelo aumento da confiabilidade dos equipamentos e processos, deverá ser base consolidada nas indústrias.

1.3 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 o tratamento destes fatores nas análises, dentre estes podemos citar Moubray (2001) e Mortelari (2014).

O trabalho se propõe a solucionar os problemas ocorridos no sistema de transporte e resfriamento de tiras, causadores de ocorrências de qualidade e paradas imprevistas no Laminador para manutenção. Sendo apenas este sistema responsável por mais de 80 horas de paradas imprevistas entre 2016 e 2017, contabilizando uma perda superior a 56 mil toneladas de aço, que correspondem a quase R\$ 4,0 milhões em perda financeira anual para a empresa, se considerarmos uma margem de contribuição de R\$ 120,0 por tonelada.

O Laminador objeto de estudo está em operação há 15 anos e possui um sistema *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) consolidado para gestão da manutenção denominado SISMANA. Este sistema foi desenvolvido internamente para agrupar e armazenar todas as informações referentes à manutenção, assim como as estratégias e plano de manutenção dos equipamentos.

De fato, uma estratégia de manutenção existe desde o início de operação, porém em alguns casos se mostra falha, deixando lacunas que permitem a ocorrência de falhas imprevistas e parada do equipamento para manutenção, fora das janelas destinadas à manutenção preventiva dos equipamentos. Pode-se observar uma necessidade de aprimoramento e a ausência de análises quantitativas para embasamento das atividades de manutenção e frequência de execução, isso acarreta em uma baixa robustez da estratégia de manutenção. Afetando a

confiabilidade dos equipamentos, no sentido de permitir falhas imprevistas, e os custos de manutenção, quando a estratégia está mal dimensionada e as atividades são realizadas fora do tempo ótimo, intervalo P-F dos equipamentos.

O sistema de resfriamento, que será tratado com mais detalhes no próximo capítulo, é composto por diversos subsistemas dispostos em série para a realização de suas funções. Uma proposta adicional do trabalho é avaliar a estratégia ideal de gestão de sobressalentes MRO (materiais indiretos aplicados à Manutenção, Reparos e Operação, que não são matéria prima para o produto final).

1.4 OBJETIVOS

Neste tópico serão apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho.

1.4.1 Objetivo Geral

Garantir a segurança, qualidade e estabilidade operacional dos processos do Laminador de Tiras a Quente, contribuindo para o cumprimento da meta estratégica de produção de 4,4 milhões de toneladas de aço laminado por ano, em 2017, alinhado com a estratégia empresarial corporativa, através da aplicação de ferramentas da Engenharia da Confiabilidade e análises qualitativas e quantitativas da estratégia de manutenção existente para propor aprimoramento dos planos de manutenção e melhoria nos equipamentos, sobretudo para garantir o cumprimento da meta de Unplanned Maintenance Stoppage Ratio (UMSR), ou índice de parada não planejada para manutenção, de 8,3% para o Laminador de Tiras a Quente.

1.4.2 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 e resfriamento de bobinas de aço;

- 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.

1.5 JUSTIFICATIVA

Apenas entre os anos de 2016 e 2017 o sistema de resfriamento foi responsável por causar aproximadamente 80 horas de parada de produção no Laminador de Tira a Quente, isso, proveniente de um sistema de concepção relativamente simples, desperta a necessidade de reavaliação da estratégia de manutenção dos equipamentos. Em grande parte dos sistemas produtivos em operação, não é raro encontramos estratégias de manutenção já ultrapassadas ainda em vigor e, em alguns casos, sem grandes perspectivas de evolução. Nas gerações anteriores de manutenção, o conhecimento probabilístico do comportamento dos sistemas não era aplicado ou não haviam condições de ser desenvolvido, obrigando aos homens de manutenção basear as estratégias unicamente no conhecimento prático, proveniente da experiência dos indivíduos envolvidos com o processo. 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.

Segundo Köche (1997), o que leva o homem a produzir ciência é a busca por respostas dos problemas que levam à compreensão de si e do mundo em que ele vive. Com base nesta alegação pode-se afirmar que a ação, por si só, de buscar o entendimento de efeitos que nos rodeiam justifica a aplicação do conhecimento científico adquirido para modelar os sistemas e simular cenários futuros, antecipando e propondo ações para eliminação de falhas.

Para o alcance da tão almejada excelência operacional, é necessário entendimento profundo dos processos e riscos inerentes. Tais riscos muitas vezes necessitam ser antecipados a fim de se evitar catástrofes operacionais e desperdício nas aplicações dos recursos, pois, conforme Moubrey (2000), não basta executar certo as ações de manutenção, é preciso executar certo as ações certas.

Advindo do exponencial aumento da complexidade dos sistemas, é imprescindível que a estratégia de manutenção seja solidificada por estudos detalhados qualitativa e quantitativamente, análises e simulações do comportamento dos componentes durante seus ciclos de vida e, principalmente, dos custos associados à manutenção da estabilidade operacional.

Neste aspecto o trabalho é justificado pela necessidade de aplicação de análise quantitativa, com o propósito de atualizar a estratégia de manutenção para o sistema, identificar e propor soluções para eliminar os modos de falha existentes, e se não for possível eliminar as falhas, vamos então eliminar suas consequências (Mortelari, 2014).

1.6 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. Conforme Silva e Menezes (2005) a pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-los e analisá-los. 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.

Quanto aos procedimentos técnicos, este trabalho irá utilizar 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.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

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

O segundo capítulo trata da 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 resfriamento de bobinas de aço, que será objeto de estudo e análise para determinação e aumento da confiabilidade.

O terceiro capítulo situa o estudo em relação aos conceitos de engenharia da confiabilidade que serão utilizados como metodologia e ferramentas para a 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 são 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 serão tratados 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 possui a 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 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.

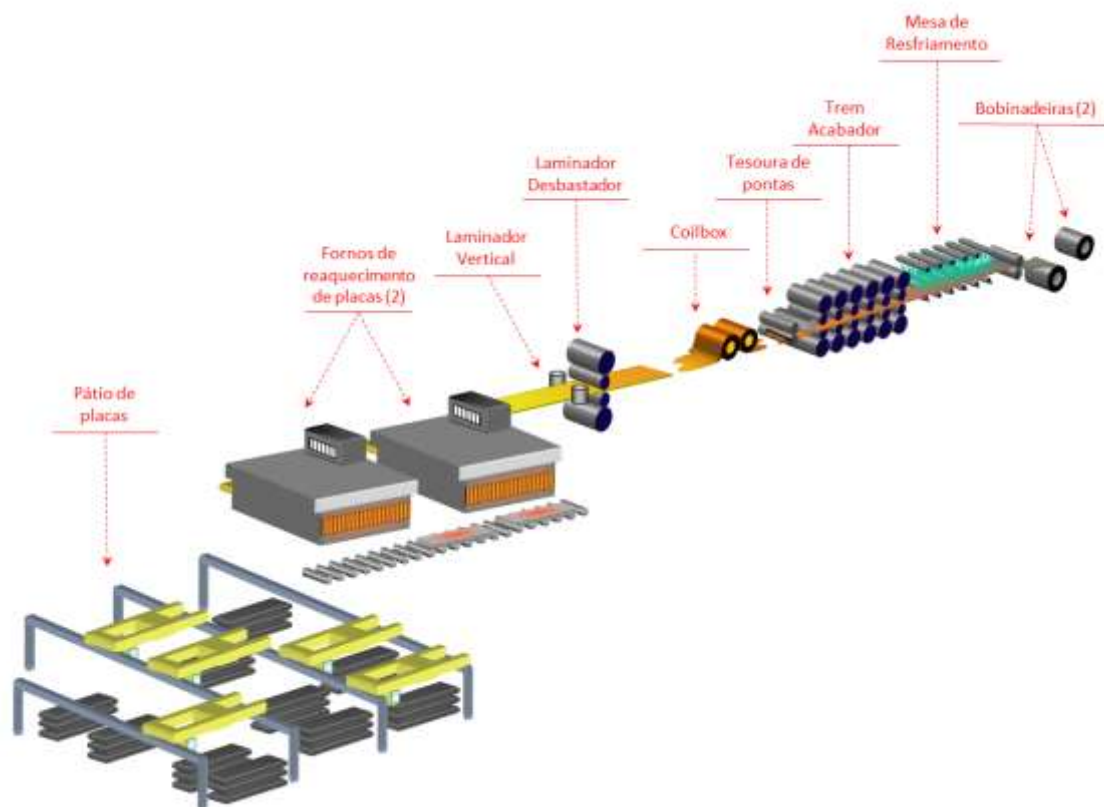
O processo de laminação a quente é um processo de transformação mecânica do aço, da forma de placas até chapas grossas ou bobinas com espessuras na faixa de milímetros. Ele consiste na redução da seção transversal por compressão do metal, através da passagem entre dois cilindros aço ou ferro fundido, 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 O LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE

O Laminador objeto de estudo possui 15 anos de operação e faz parte de uma usina integrada de produção de aço. A implantação do Laminador de Tiras a Quente permitiu a produção de bobinas de laminadas a quente a partir do beneficiamento das placas fabricadas internamente. 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 para aumento de produção para 4,5 milhões, este Laminador permite a fabricação de bobinas com grande variação de características metalúrgicas, tamanho e espessura.

Figura 2.1 - Layout geral do Laminador de Tiras a Quente.



Fonte: Adaptação de arquivo pessoal (2017).

Como pode ser visto na figura 2.1, o processo de laminação a quente está dividido entre equipamentos responsáveis pela movimentação das placas de aço até o enformamento, fornos para aquecimento das placas até temperaturas em torno de 1200 °C, laminador vertical responsável por manter a largura do material dentro dos parâmetros necessários durante a laminação, laminador desbastador que realiza os primeiros passes de laminação, responsáveis por uma grande redução na espessura da placa de aço que, após este processo, para a ser chamada de esboço ou chapa grossa. No *Coilbox* o esboço é bobinado, para homogeneizar a temperatura em seu comprimento e permitir uma distância menor entre o laminador desbastador e o de acabamento, reduzindo o comprimento total da linha de produção. Após ser desbobinado, a ponta do esboço, que nesta etapa está deformada pelo processo de laminação, é cortada na tesoura de pontas e, posteriormente encaminhada ao laminador acabador para que tenha sua espessura reduzida à casa de milímetros. Quando o esboço é transformado em tira de aço, esta é encaminhada a um processo de resfriamento laminar, na mesa de resfriamento e, no último processo de

laminação, denominado bobinamento, é realizada a transformação desta tira de aço em uma bobina de aço laminada a quente.

2.1.1 Fornos de Reaquecimento de placas

Este sistema é responsável pelo processo anterior ao de laminação, o reaquecimento das placas de aço. Possui uma estrutura externa toda em aço doce, constituído de seções de aço laminado e chapeamento, desenhadas para reter e apoiar os refratários do forno, queimadores e portas. É revestido internamente por material refratário, tendo como principal função o aquecimento de peças de aço (tarugo, bloco ou placa) maior ou igual a 900°C a menor ou igual 1400°C. Está instalado entre o pátio de placas e o laminador desbastador. Em geral possuem as seguintes características:

- Câmara refratária, com materiais isolantes para minimizar a troca de calor entre o ambiente interno e externo ao forno;
- *Skids* fixos para suportar a carga e móveis para transportar a carga, desde a zona de carregamento até o descarregamento;
- Queimadores, utilizados para queimar gases combustíveis e permitir o aquecimento e controle da temperatura interna dos fornos;
- Chaminé para exaustão dos gases queimados internamente;
- *Damper* para controle da pressão interna;
- Sistema de enforamento automático das placas de aço;
- Sistema de desenforamento automático das placas de aço;

Neste Laminador em estudo os fornos de aquecimento possuem algumas características específicas que estão listadas abaixo.

- Fornos tipo *Walking Beam*, no qual as placas são transportadas por vigas móveis e apoiadas em vigas fixas, até atingirem a zona de descarregamento;
- O combustível utilizado é o gás misto. Irá aquecer placas de aço carbono enforadas de 25°C a 800°C e desenforadas a aprox.

1250°C e placas de aço inox enforadas a 25 °C e desenforadas a aproximadamente 1300 °C;

- Capacidade do Forno: 400 t/h
- Comprimento (porta a porta): 55600 mm
- Largura inferior: 12100 mm

Possui capacidade para trabalhar com dimensões de placas com largura de 750 mm a 1955 mm, comprimento de 4500 mm a 11500 mm, cuja temperatura no enforamento pode variar de 25°C (enforamento a frio (*cold charge*)) a 800°C (enforamento a quente (*hot charge*)).

- A temperatura de desenforamento é dependente da característica do produto enforado para laminação, podendo variar de 1160 °C a 1300 °C;

2.1.2 Laminador Desbastador

Primeira etapa do processo de laminação propriamente dito, que proporciona uma grande redução da espessura do material. O laminador de desbaste é, na verdade, um conjunto de duas cadeiras de laminação, o RM (laminador horizontal) e o VE (laminador vertical). Nesta etapa, ocorre o processamento da placa de aço reauecida nos fornos e são realizados sucessivos passes de redução em um laminador quádruo reversível até que o material (esboço) fique com a espessura necessária à etapa seguinte.

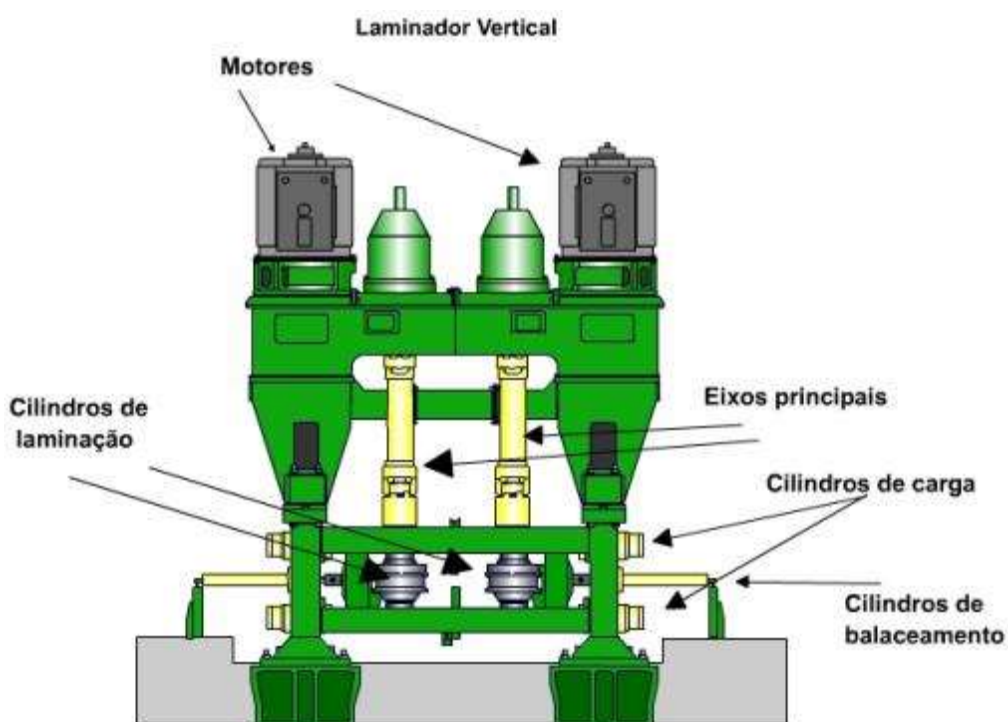
O laminador vertical, ou VE, é o responsável pela redução de largura da placa a ser laminada pelo laminador horizontal. Em cada lado do laminador há um cilindro de laminação vertical acionado por um motor, acoplado por um eixo vertical de transmissão. Com a finalidade de introduzir o material no laminador há dois rolos alimentadores, um na entrada e outro na saída do laminador, acionados independentemente (VAI UK, 2000).

Laminando apenas nos passes ímpares, os cilindros movimentam-se transversalmente em relação à mesa de rolos, abrindo e fechando na cadeira, a abertura máxima é de 2150 mm e a mínima é de 550 mm, este movimento é efetuado por meio de cilindros hidráulicos, dois cilindros hidráulicos são responsáveis por movimentar o cilindro de laminação no sentido de fechar o cilindro

de laminação, enquanto um terceiro cilindro hidráulico de diâmetro menor é responsável pelo balanceamento, isto é, faz uma força contrária no sentido de abrir o cilindro de laminação e eliminar folgas no conjunto. Existem dois desses conjuntos de cilindros hidráulicos, um conjunto para cada cilindro de laminação.

Os cilindros do laminador vertical possuem também um movimento de rotação, onde cada cilindro é acionado individualmente por uma caixa de redução acoplada em um motor elétrico de 1500 kW de potência, a relação de engrenagens da caixa de redução é de 21/5. O sincronismo dos cilindros é feito de modo automático e eletrônico. Na figura 2.2 é apresentada uma vista em corte de um laminador vertical.

Figura 2.2 - Vista lateral em corte de um Laminador Vertical.



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2008).

O laminador horizontal, ou RM, está localizado entre os fornos e o trem acabador e é o responsável pela redução de espessura da placa a ser laminada pelo desbastador, é do tipo cadeira reversível 4-Hi universal (4 cilindros), que consiste no uso de quatro cilindros de laminação: dois de trabalho e dois de encosto, empilhados de forma vertical. O processo de desbaste pode ser acionado com velocidade de até

6.31 m/s para manter uma alta temperatura de saída, sendo que cada cilindro de trabalho é diretamente acionado por motor AC 7500 kW.

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 2.3.

Fotografia 2.3 - Laminador Vertical e laminador Desbastador.



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2008).

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.

2.1.3 Coilbox

O *Coilbox* está localizado entre o laminador desbastador e o laminador de acabamento, sendo usado para rebobinar os esboços após o passe de desbaste. Na fotografia 2.4 podemos ver em detalhe o bobinamento de um esboço no *Coilbox*.

Fotografia 2.4 - Detalhe de um *Coilbox*.



Fonte: Primetals (2017)

O *Coilbox* também permite uma menor distância entre o laminador desbastador e laminador de acabamento, bem como minimiza a queda de temperatura do esboço até que seja carregado no laminador de acabamento. Além disso, contribui homogeneizar e reduzir a queda de temperatura nas espiras internas da bobina. Podemos citar algumas características do *Coilbox*:

- Prevenção da queda de temperatura na espira interna da bobina;
- Prevenção da queda de temperatura da borda da bobina através de escudos térmicos laterais ajustáveis;
- Bobinamento de passo curto através de maior velocidade de bobinamento e transferência forçada da bobina da posição de

bobinamento para a de desbobinamento, permitindo maior produtividade;

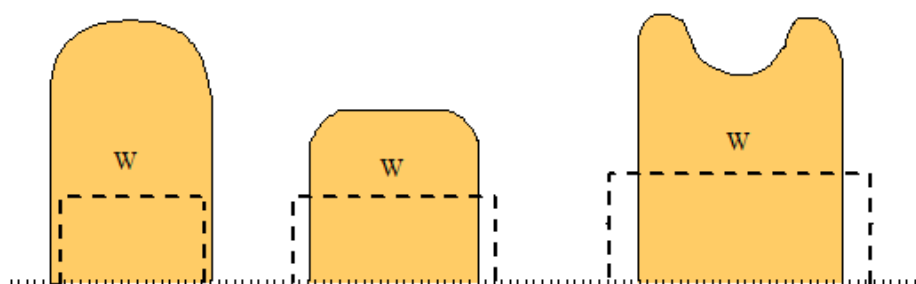
- Operação estável do laminador de acabamento através de temperatura mais alta e uniforme ao longo de todo o comprimento da barra de transferência;
- A passagem através do Coilbox sem bobinamento pode ser selecionada de acordo com os métodos de produção e operação a serem utilizados;

O Coilbox possui escudos térmicos laterais, o que contribui para a redução da queda de temperatura na borda da bobina (Primetals, 2015).

2.1.4 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 2.5, existem diferentes tipos de pontas e caudas de esboços, conforme taxa de redução de espessura e largura no processo de transformação da placa em esboço.

Figura 2.5 - 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).

2.1.5 Trem Acabador

Nesta etapa, o material formado no laminador desbastador (esboço) sofre novamente uma redução de espessura, até a característica final desejada, ao passar por um trem de laminação contendo seis cadeiras. Neste processo são produzidas tiras de espessura entre 1,5mm e 16,0mm.

No trem acabador cada cadeira de laminação é equipada com uma cápsula hidráulica apenas para realizar o fechamento do gap e aplicação da força de laminação sobre o esboço, mantendo baixas as tolerâncias de espessura, conforme pode ser observado na fotografia 2.6. Podemos citar como controles automáticos de um trem acabador:

- *Automatic Gauge Control (AGC)*: Controla a espessura de saída da tira;
- *Hydraulic Gap Control (HGC)*: Controla a abertura entre os cilindros de trabalho;
- *Looper* hidráulico: Responsável pelo ajuste e pela manutenção da tensão da tira entre as cadeiras e pelo controle do fluxo de massa;
- *Continuous Variable Crown (CVC)*: Ajusta o coroamento dos cilindros de trabalho, controlando sua posição na direção axial;
- *Work Roll Bending System (WRB)*: Força os cilindros de trabalho contra os cilindros de encosto para controlar o coroamento daqueles, compensando o coroamento térmico e melhorando a forma e a planicidade da tira;

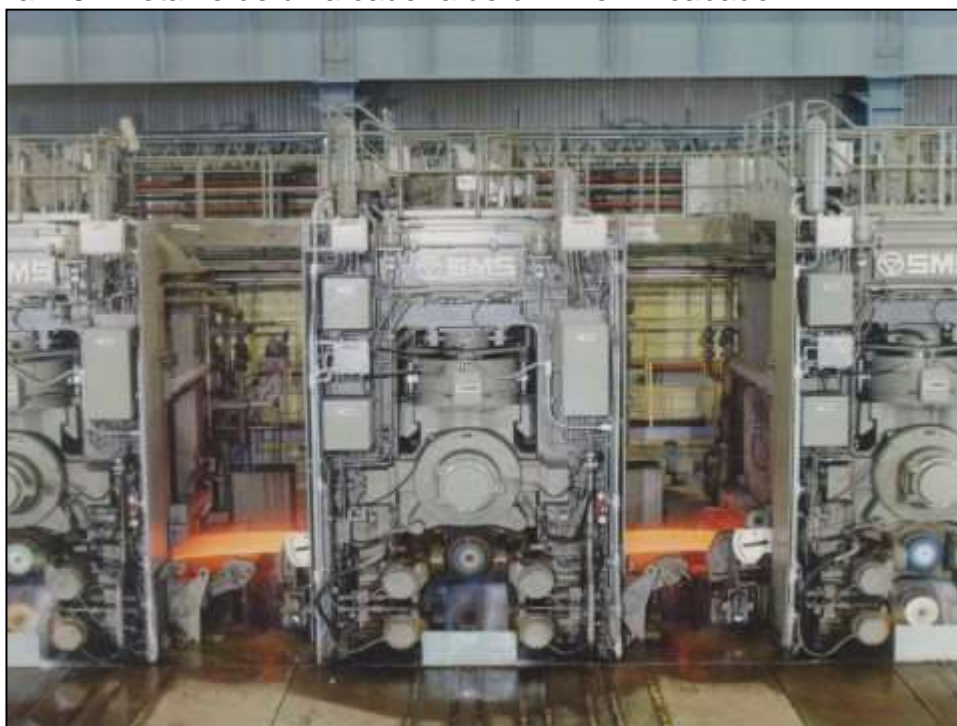
Todo o controle do trem acabador é realizado em malha fechada, para espessura, perfil e planicidade do material. Um medidor multifunção realiza a medição destas características do material laminado após a sexta cadeira e realimenta os sistemas de controle para ajuste dos parâmetros de laminação, garantindo, em todos estes aspectos, a qualidade do produto final laminado no trem acabador (SMS Demag, 2000).

Entre as cadeiras de laminação do trem acabador existem rolos acionados hidráulicamente para controle de tensão e fluxo de massa. Também são instalados entre as cadeiras sistemas de aspersão de água sob pressão, para controle de temperatura de laminação e remoção de carepa superficial. Em cada cadeira está

presente um sistema para lubrificação do contato entre os cilindros de laminação e a tira laminada, possuem a função de reduzir desgastes dos cilindros de laminação e aumentar a qualidade superficial das tiras. Chuveiros aspersores de água também estão presentes em todas as cadeiras para refrigerar os cilindros de trabalho e encosto, evitando danos por superaquecimento nos cilindros de laminação.

Em resumo, com este equipamento é possível obter bobinas a quente com variação de espessura extremamente baixa e uma excelente forma, além de microestrutura e propriedades mecânicas uniformes.

Fotografia 2.6 - Detalhe de uma cadeira de um Trem Acabador.



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2002).

2.1.6 Mesa de Resfriamento

Após sair do Trem Acabador a tira deve ser resfriada 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.

2.1.7 Controle de temperatura

O controle da temperatura de bobinamento é feito de forma automática, com a aplicação de ajustes calculados por modelo matemático de resfriamento, integrado ao sistema de automação do Laminador, a partir de dados de processo coletados e atualizados em tempo real.

Ao longo do comprimento da tira, em função da variação de velocidade e da temperatura de acabamento (saída do Trem Acabador), sistemas dinâmicos tipo *feedforward* – controle avante – e *feedback* – controle a partir da informação da temperatura de bobinamento real –, através de sinal enviado por pirômetros instalados ao longo da mesa, corrigem a quantidade de seções abertas previstas pelo setup inicial. A partir do perfil de temperatura obtido, modelos adaptativos e de aprendizado refinam o setup das tiras seguintes, de acordo com a família do aço e dimensão. A precisão do acerto de temperatura de bobinamento nesse tipo de controle é significativamente melhor, justificando sua adoção para a garantia da qualidade e características metalúrgicas do produto final (SILVA, 2011).

2.1.8 Equipamentos da mesa de resfriamento

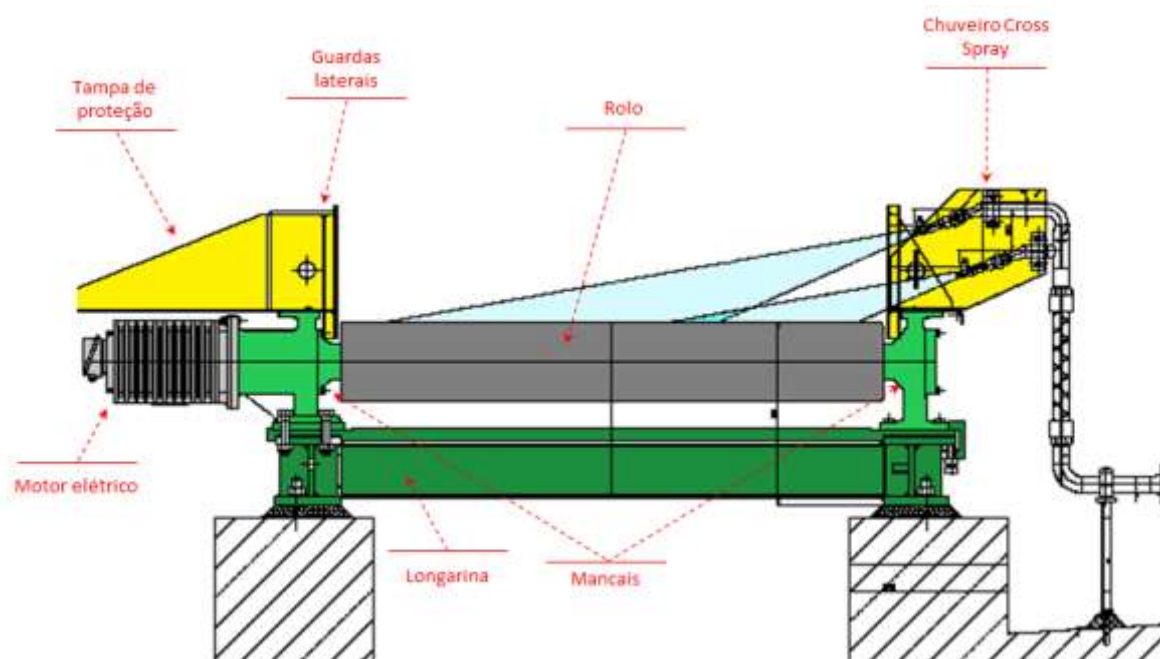
A mesa de resfriamento transporta a tira da saída da última cadeira de laminação (F6) até as bobinadeiras, a uma velocidade de até 18 m/s. A ROT é composta por 268 conjuntos de rolos – motor, redutor, rolo e mancais –, instalados em série e divididos em 9 seções, cada uma destas acionadas por um drive dedicado que pode estar em sincronismo de velocidade entre outros drives, com a cadeira F6 ou com as bobinadeiras, dependendo da posição da tira na mesa. A mesa possui um sistema de resfriamento dos rolos, os quais são internos, do rolo 1

ao 23, e externos, entre os rolos 24 a 211, os demais não possuem refrigeração exclusiva.

Ainda na mesa de resfriamento estão instaladas guardas laterais ao longo de todo o seu comprimento, com a função de guiar a tira até as bobinadeiras e impedir colisões entre a tira e os mancais dos rolos, as guardas são divididas entre as seções de rolos, uma seção corresponde de 33 a 34 unidades de acionamento.

Para varrer a água utilizada para resfriamento da tira entre as seções de resfriamento, estão presentes, entre as seções, chuveiros que projetam um jato d'água transversalmente ao sentido de laminação. Isso é necessário para a retirada da água quente que se acumula sobre a tira e impede uma troca eficiente de calor. Esses chuveiros são também chamados de *cross spray*.

Figura 2.7 - Detalhe de um conjunto típico de transporte de tiras.



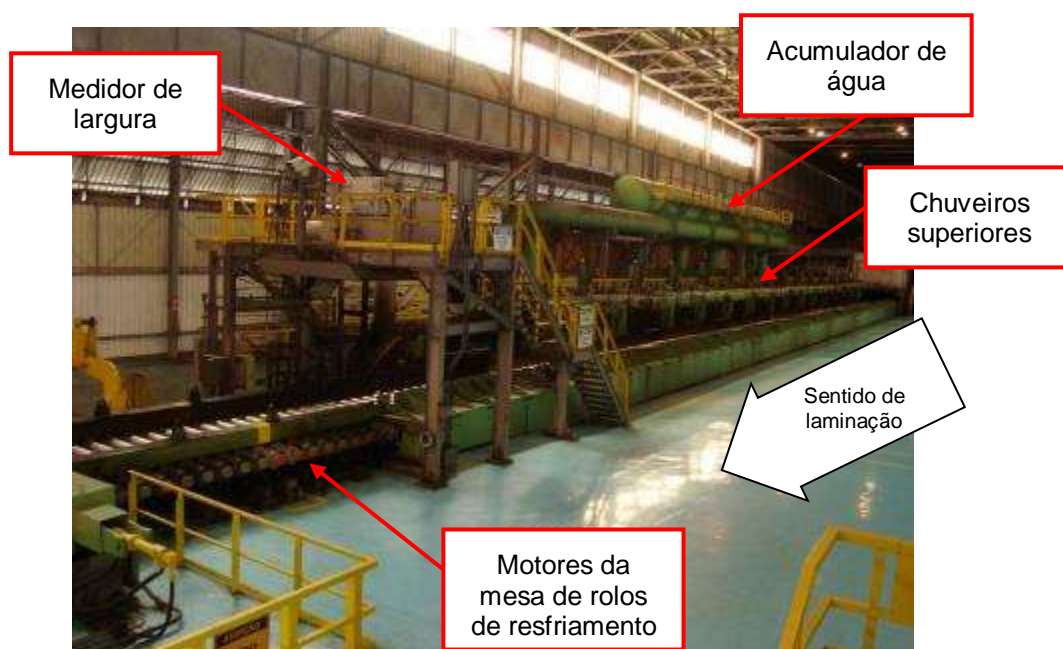
Fonte: Adaptação arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2017).

A figura 2.7 traz um detalhamento de uma unidade de acionamento, iguais a essa estão presentes 268 unidades na mesa de resfriamento. O conjunto de 33 a 34 unidades deste tipo, acionadas por um mesmo drive AC, é chamado de seção 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 fotografia 2.8.

Fotografia 2.8 - Vista geral de um sistema de resfriamento de bobinas.



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão (2017).

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;

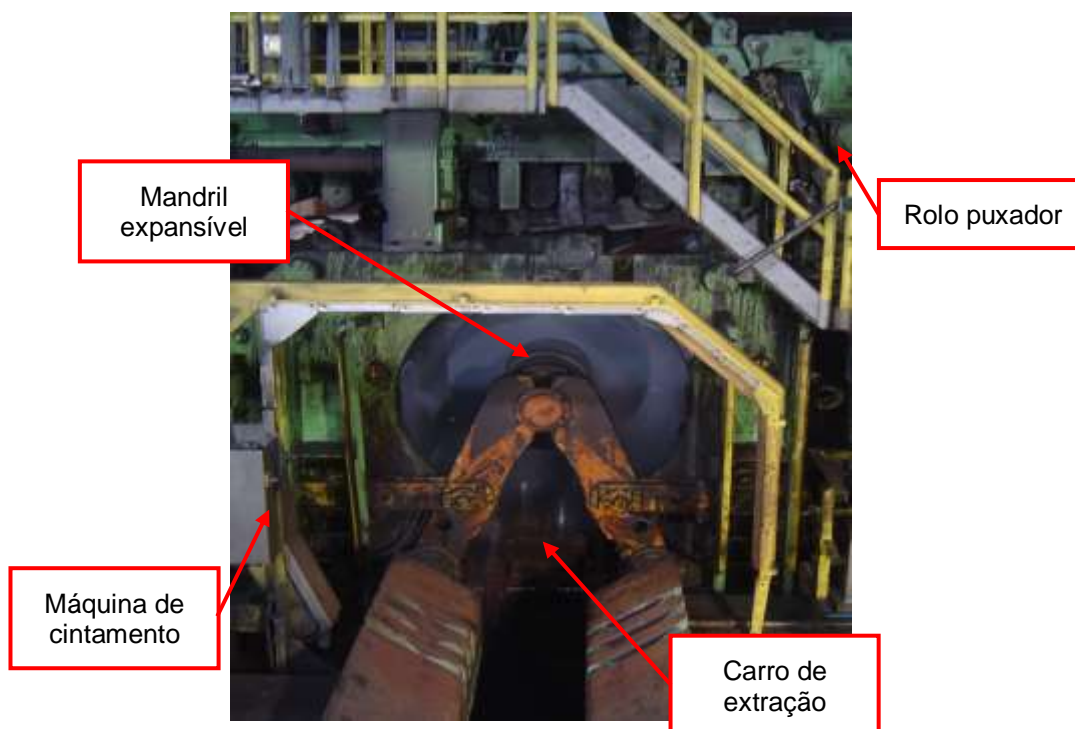
- Diâmetro do rolo: 300 mm
- Comprimento do corpo do rolo: 2.050 mm
- Velocidade máxima da mesa: 18.0 m/s

2.1.9 Bobinadeiras

Para o processo de bobinamento dos materiais 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 as necessidades dos clientes.

Assim que a tira se aproxima das bobinadeiras, ela é centrada e guiada por meio de guardas laterais e mesas transportadoras alinhadas em frente a bobinadeira. Um conjunto de rolos puxadores (*pinch rolls*) – 1 superior e 1 inferior – em frente a cada bobinadeira avança o topo da tira até o mandril da mesma, no qual a tira é bobinada firmemente com o auxílio dos rolos abraçadores (*wrapper rolls*).

Fotografia 2.9 - Vista frontal de uma bobinadeira em operação.



Fonte: Arquivo interno ArcelorMittal Tubarão

Como mostra a fotografia 2.9, as bobinadeiras estão equipadas com rolos abraçadores operados hidraulicamente, permitindo a aplicação de um sistema de controle de salto “degrau” (*Automatic Jump Control*), para assegurar uma boa qualidade de superfície da tira e conseqüentemente da bobina a qual ficará isenta de telescopicidade, assim como evitar sobrecargas nos rolos abraçadores e seus sistemas de ajuste.

2.2 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 à condições críticas de operação e sofrem degradações agressivas durante seus ciclos de vida.

No caso específico da mesa de resfriamento estão presentes alguns dos piores fatores para a degradação de equipamentos elétricos.

- Calor;
- Particulados de aço (carepa);
- 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 seguir e ações para eliminação serão propostas.

3 CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Dentre as diversas literaturas e autores de bibliografias a respeito de confiabilidade, podemos 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, podemos resumir seu conceito como sendo a probabilidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições específicas e por um período de tempo 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 traçarmos 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

Podemos 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 determinarmos quando uma condição não é satisfatória, entretanto, precisamos 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.

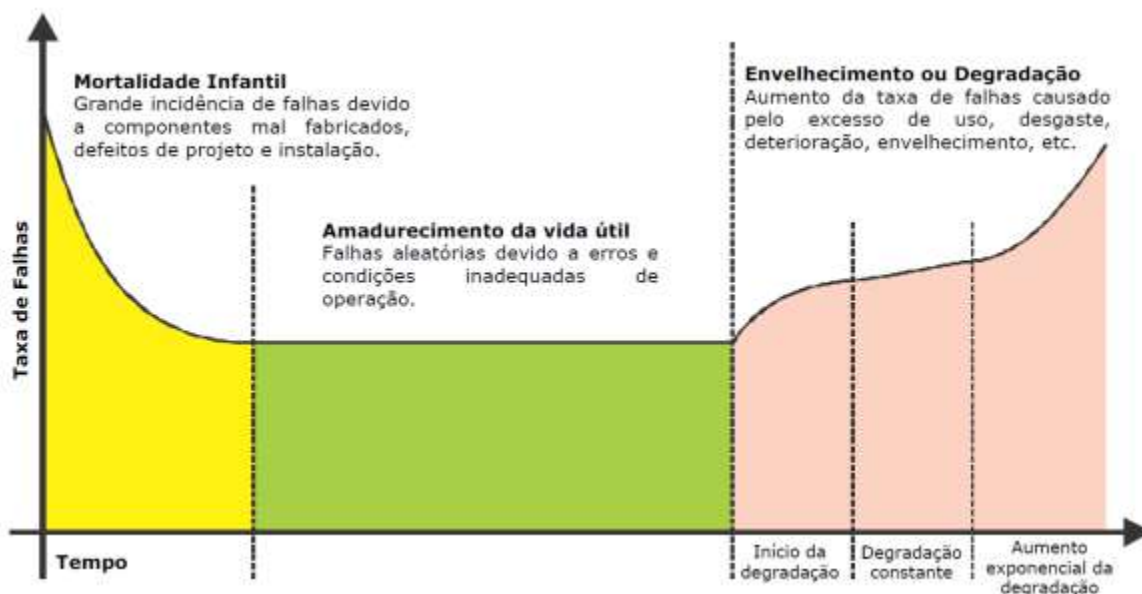
3.2.1 Falha Funcional

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”. Sendo proposto que a taxa de falha é alta no início da vida operacional do componente, caracterizando uma falha prematura, decresce a 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.

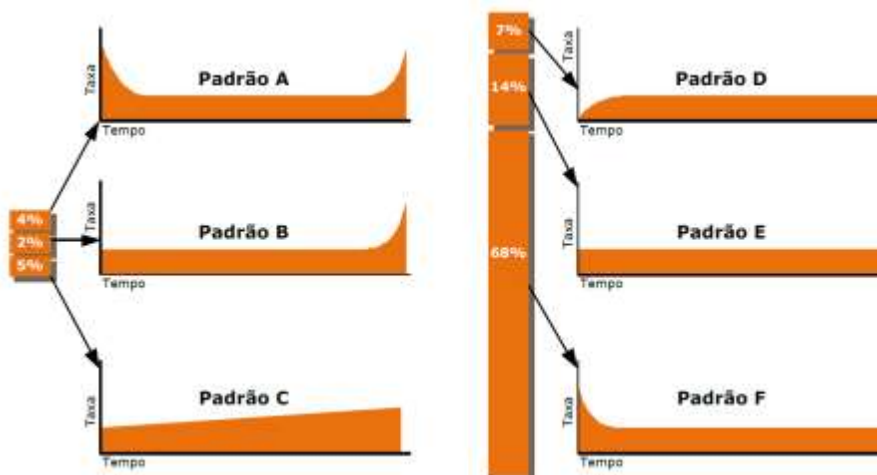


Fonte: GUTIÉRREZ, Luis A. Mora. (2005, pg. 80)

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 vamos detalhar 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: Adaptado por BARAN, 2011, de NASA (2008, p. 4-7)

- 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

Podemos 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 poder 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 especificarmos 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 através da medição da importância da confiabilidade daquele componente para o sistema. A importância da confiabilidade, I_{R_i} , 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 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 Moubray (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 poder ser feito para antecipar, prevenir, detectar, corrigir ou até mesmo eliminá-lo.

4 DESENVOLVIMENTO

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 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 motor de indução com resistência de isolamento menor que 200 MΩ durante inspeção preditiva nas paradas programada de manutenção. Ou seja, todos os componentes que foram substituídos preventivamente, em algum momento entre as medições, 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 resfriamento irá afetar a produção no Laminador de Tiras a Quente. Seja no aspecto operacional ou no aspecto de qualidade do produto final;
- A concepção do sistema corresponde a um sistema totalmente em série. A falha em qualquer unidade de acionamento impacta na operação do Laminador;

Aplicando estas premissas no tratamento dos dados históricos será possível a simulação do comportamento dos equipamentos neste cenário.

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 20 meses, a partir de janeiro de 2016 até setembro de 2017. Nesta janela é possível a identificação da maior parte dos modos de falha do sistema com densidade de dados adequada para a análise.

Com este intervalo foram adquiridos quase 40.000 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 (2017)

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, 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 SISMANA (CMMS)

Este aplicativo é o CMMS (*Computerized Maintenance Management System*), sistema computadorizado de gerenciamento de manutenção, desenvolvido internamente e aplicado 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: a maioria dos atendimentos e intervenções de manutenção realizadas são registradas no CMMS pela equipe de atendimento à emergências, a nível de componente, assim como as análises de falha elaboradas para cada parada

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 CMMS. Possuem detalhes das etapas realizadas, recursos utilizados e ocasião do evento;

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 âmbito 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.

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.

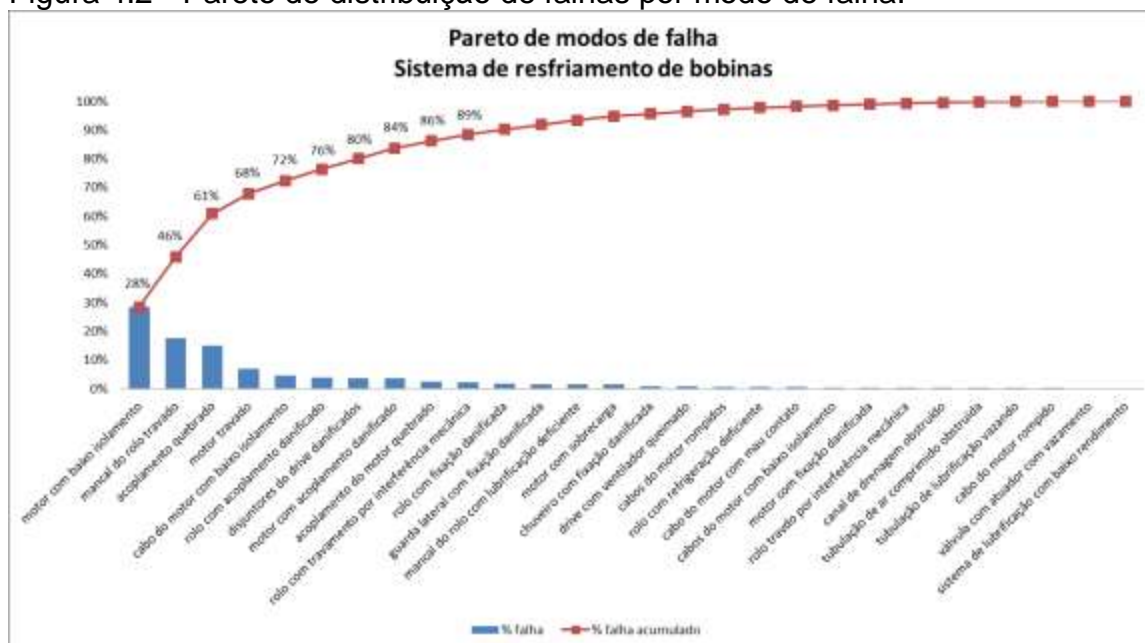
Deste sistema foram extraídos detalhes das ocorrências de paradas de produção decorrentes de falhas em equipamentos.

4.3 RESULTADOS HISTÓRICOS OBTIDOS

Da compilação dos dados históricos obtidos pela pesquisa realizada, no período entre 01/01/2016 e 30/09/2017, podemos calcular alguns parâmetros importantes.

- Registros de 284 ocorrências de falhas em componentes do sistema de transporte e resfriamento de bobinas;
- As falhas registradas neste período corresponderam a 76 horas de parada de produção;
- Foram identificados 28 modos de falhas entre os componentes do sistema, que podem ser identificadas no gráfico de Pareto da figura 4.2;
- As falhas em motores representaram 43% do tempo de parada operacional e, do restante, aproximadamente 50% foi atribuído a falhas nos acoplamentos e em rolos, com 25% e 24% respectivamente, como mostra a figura 4.2;

Figura 4.2 - Pareto de distribuição de falhas por modo de falha.



Fonte: O autor (2017)

O gráfico de Pareto da figura anterior demonstra que 80% do tempo de parada não programada para manutenção foi causado por 25% dos modos de falha identificados, sendo os principais, motor com baixo isolamento, mancal do rolo travado, acoplamento do motor quebrado e motor travado. Este comportamento corrobora com o princípio de Pareto, onde 20% das causas correspondem a 80% dos efeitos. Conforme afirmação de Koch (2000), os resultados mais importantes provêm de uma pequena parcela de ações, ou seja, a maioria das ações gera muito pouco resultado ou quase nenhum.

[...] uma minoria de causas, inputs ou esforços normalmente conduzem a uma maioria dos resultados, produtos ou recompensas. Significa, por exemplo, que 80% daquilo que você realiza em seu trabalho vem de 20% do tempo gasto. Assim, para todas as finalidades práticas, quatro quintos do esforço – uma parcela dominante – são em grande parte irrelevantes. Isto é o contrário do que as pessoas normalmente esperam. (KOCH, 2000, p. 15).

Tabela 4.1 - Perdas de produção e financeiras por ano

Perda de produção		
Período observado	20	meses
Paradas imprevistas	75,7	horas
Paradas / ano	45,42	horas
Produtividade média	700	ton/hora
Perda de produção / ano	31794	tons
Perda financeira		
Margem de contribuição (bobinas de aço)	120	R\$/ton
Perda financeira / ano	3.815.280,00	R\$

Fonte: O autor (2017)

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

Figura 4.3 - Distribuição do tempo de parada por equipamento.



Fonte: O autor (2017)

Do detalhamento dos tempos de parada em relação aos componentes que apresentaram alguma perda de função obtém-se o gráfico da figura 4.3, demonstrando que os motores elétricos são os principais contribuintes para as paradas imprevistas na mesa de resfriamento, em termos de tempo de parada imprevista.

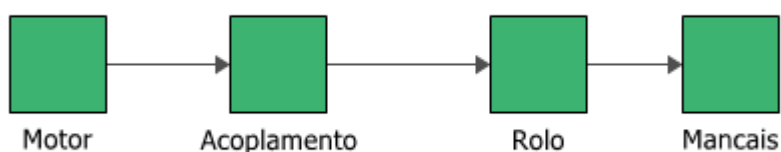
4.4 MODELAMENTO DO SISTEMA

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

- Motor;
- Acoplamento;
- Rolo;
- Mancais;

Esta divisão tomou como base a árvore de cadastro dos equipamentos no CMMS. Dela obtém-se o diagrama de blocos de confiabilidade (RBD) da figura 4.4, utilizado para o modelamento do sistema.

Figura 4.4 - Diagrama de blocos de confiabilidade da unidade de acionamento.



Fonte: O autor - aplicação do software BlockSim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

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 4.2 estão disponíveis alguns dados técnicos dos motores instalados na mesa de resfriamento, para efeito de contextualização e comparação.

Tabela 4.2 - Dados técnicos dos motores.

Alimentação	Trifásico	Potência	10,8 cv
Altitude	1000 m.a.n.m.	Polos	6
Categoria / Design	Categoria N	Carcaça	160L
Classe De Isolamento	H (DT=80K)	Tensão	380 C/ 3 terminais
Fator De Serviço	1	Forma construtiva	B5
Frequência	60 Hz	Temp. Amb. Máx.	40°C
Grau De Proteção	IPW66	Tipo de Acoplamento	Direto
Material Invólucro	Ferro	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 (2017)

Através do histórico de eventos de falha ocorridos nos motores do sistema, foi elaborado um mapa demonstrando a distribuição das falhas entre as diferentes posições das unidades de acionamento. Obteve-se o *heat map* da figura 4.5.

Figura 4.5 - *Heat map* de falhas em motores do sistema.

Seção	Motor	Posições																																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
S1	Motor																																		
	Falhas																																		
S2	Motor	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	
	Falhas																																		
S3	Motor	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	
	Falhas																																		
S4	Motor	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	
	Falhas																																		
S5	Motor	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166
	Falhas																																		
S6	Motor	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
	Falhas																																		
S7	Motor	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234
	Falhas																																		
S8	Motor	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268
	Falhas																																		

Legenda:

	6 ou mais falhas
	5 falhas
	4 falhas
	3 falhas
	2 falhas
	1 falha
	Nenhuma falha
	Região com cross spray

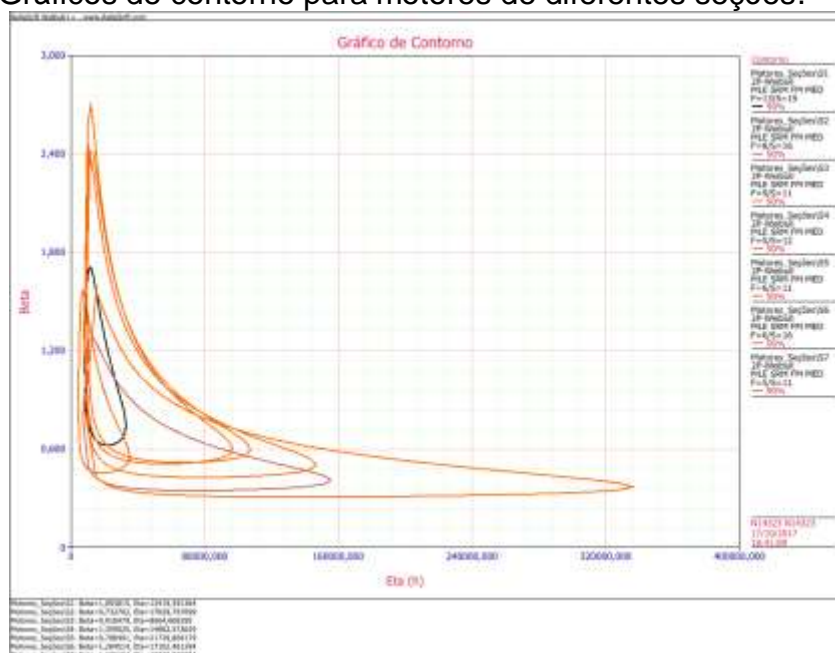
Fonte: O autor (2017)

Com a análise qualitativa deste mapa, algumas hipóteses podem ser levantadas em relação aos padrões de distribuição de falhas entre as posições de instalação dos subsistemas, que serão testadas no software a fim de serem aceitas ou descartadas.

- I. As seções iniciais (1 e 2) apresentam mais falhas em motores do que as demais seções;
- II. Os motores nas regiões dos chuveiros *cross spray* apresentam mais falhas do que as demais regiões.

Para o teste da hipótese I 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 4.6.

Figura 4.6 - Gráficos de contorno para motores de diferentes seções.

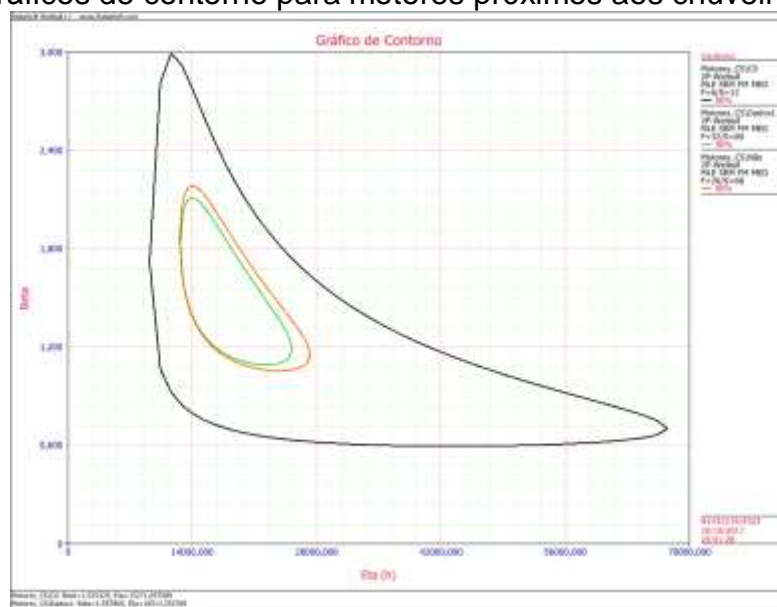


Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

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, com um grau de certeza de 90%. Desta forma não podemos dizer que a taxa de falha em motores entre as seções da mesa de resfriamento é diferente.

Já para o teste da hipótese II, os dados foram agrupados entre as posições que ficam próximas a um chuveiro *cross spray* ou não, mais uma vez os dados foram simulados e os gráficos de contorno da figura 4.7 foram obtidos.

Figura 4.7 - Gráficos de contorno para motores próximos aos chuveiros *cross spray*.



Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Decorrente da análise dos gráficos de contorno da figura 4.7, podemos constatar a sobreposição dos contornos e rejeitar a hipótese de que em regiões próximas aos chuveiros Cross Spray os motores possuem uma maior taxa de falha, com um grau de certeza de 90%.

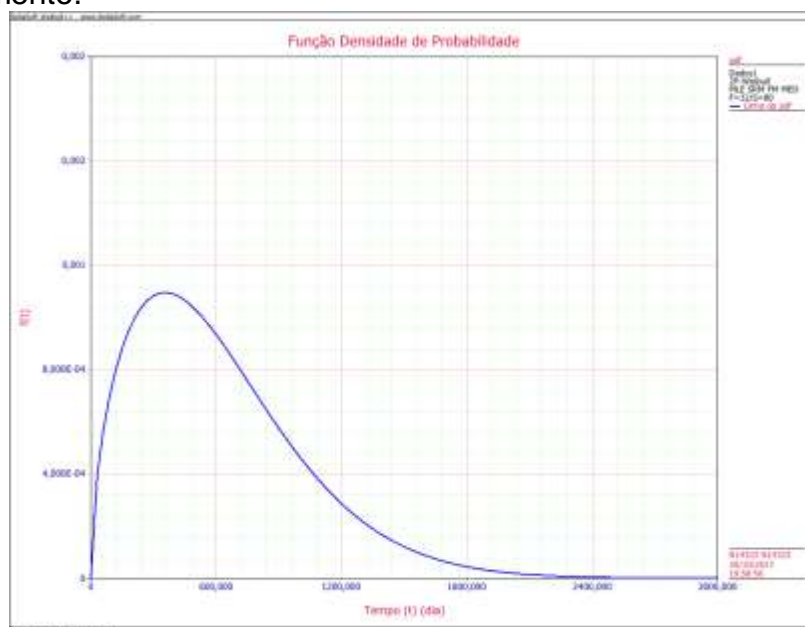
Com a rejeição das duas hipóteses levantadas para o comportamento das falhas em motores da mesa de resfriamento, para as simulações, podemos definir a premissa de que a taxa de falha dos motores não é fortemente impactada pela posição do motor ao longo da mesa. Desta forma a distribuição de falha nos motores será considerada igual para efeitos de simulação.

Desta forma, os dados de falha em motores foram inseridos em uma mesma análise e simulados, obtendo-se os parâmetros de confiabilidade da tabela 4.3 e curvas de confiabilidade e PDF das figuras 4.8 e 4.9, respectivamente.

O parâmetro de forma $\beta=1,55$, obtido pela simulação da distribuição de falhas em motores do sistema, define que os motores apresentam uma distribuição de falha constante com viés crescente ($\beta>1$), caracterizando falha por envelhecimento ou desgaste. Para o parâmetro $\eta=688$ dias, conclui-se que neste

Fica evidente com a análise do gráfico da figura 4.8 uma densidade maior de falhas no intervalo de 0 a 400 dias, confirmado o valor do eta obtido.

Figura 4.9 - Função Densidade de Probabilidade de motores da mesa de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

A PDF disponível na figura 4.9 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 688 dias.

4.4.2 Falha em rolos

As falhas ocorridas nos rolos e mancais de cada unidade de acionamento foram inseridas no Weibull e simuladas utilizando-se uma distribuição de Weibull bi paramétrica e uma aproximação da curva por análise de máxima verossimilhança, por possuir uma maior aderência com os dados de falha, que possuem diversas suspensões à direita.

Tabela 4.3 - Parâmetros de confiabilidade dos rolos da mesa de resfriamento.

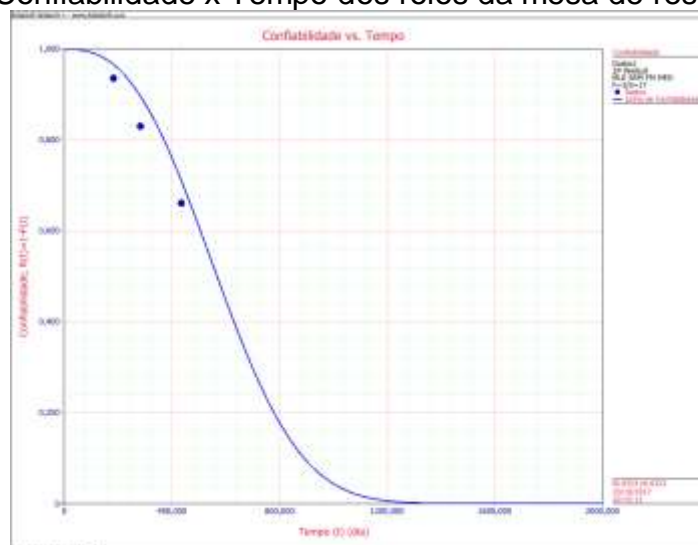
Mancais dos Rolos\Dados1	
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	2,660886
Eta (dia)	651,990638
Valor da LK	-23,653901
F \ S	3 \ 17
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=1,312706	CV Eta Beta=-147,008485
CV Eta Beta=-147,008485	Var-Eta=36476,165401

Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Os parâmetros obtidos pela simulação, disponíveis na tabela 4.3, $\beta = 2,66$, que corresponde a uma distribuição de falhas crescente e padrão característico de desgaste, o que representa a realidade dos rolos em operação no sistema.

Além da distribuição de falha obtida através dos dados históricos, uma outra distribuição foi adicionada aos rolos, referente ao desgaste do corpo do rolo proveniente do atrito com a tira de aço. Esta distribuição foi considerada uma exponencial, com o tempo até falha de 6 anos, conforme histórico de trocas de rolos por desgaste.

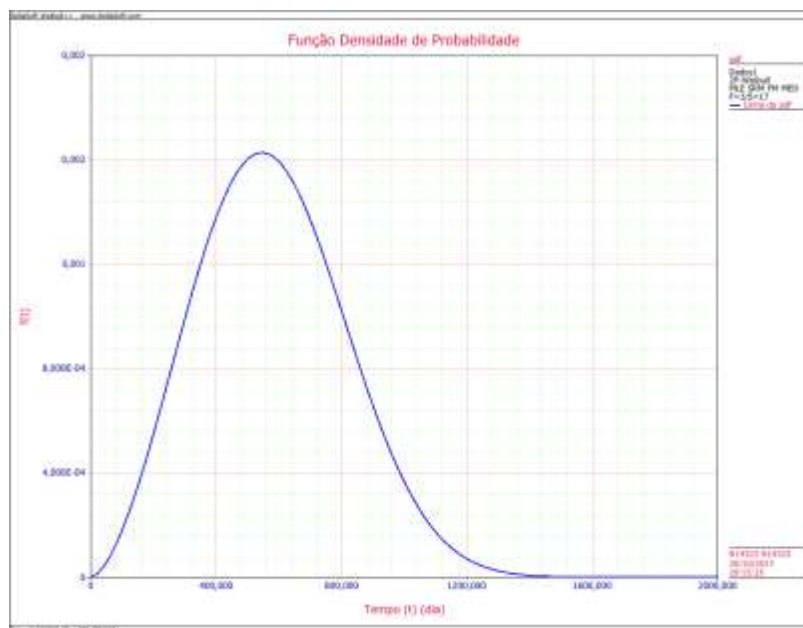
Figura 4.10 – Curva Confiabilidade x Tempo dos rolos da mesa de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

A curva de confiabilidade no tempo foi aproximada pela análise de máxima verossimilhança e demonstra os resultados obtidos para o parâmetro $\eta = 651$ dias, correspondendo ao intervalo onde 63,5% dos rolos apresentarão falha.

Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade dos rolos da mesa de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

A curva da PDF mostra que as falhas estarão concentradas no intervalo de 400 a 600 dias de operação, demonstrando a vida característica dos rolos.

4.4.3 Falha em acoplamentos

Mesmo tendo sido obtidos poucos registros de falhas no período observado, 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 4.4.

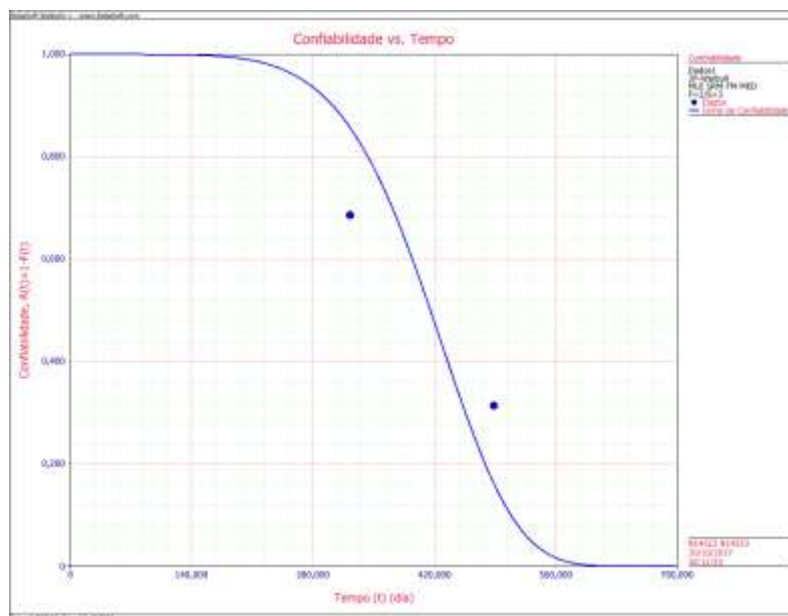
Tabela 4.4 - Parâmetros de confiabilidade dos acoplamentos da mesa de resfriamento.

Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	5,952168
Eta (dia)	441,813243
Valor da LK	-11,662933
F \ S	2 \ 3
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=10,693909	CV Eta Beta=49,314064
CV Eta Beta=49,314064	Var-Eta=2982,252619

Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Os parâmetros obtidos pela simulação, disponíveis na tabela 4.4, $\beta = 5,95$, correspondem a um comportamento de taxa de falha crescente e padrão característico de envelhecimento e desgaste.

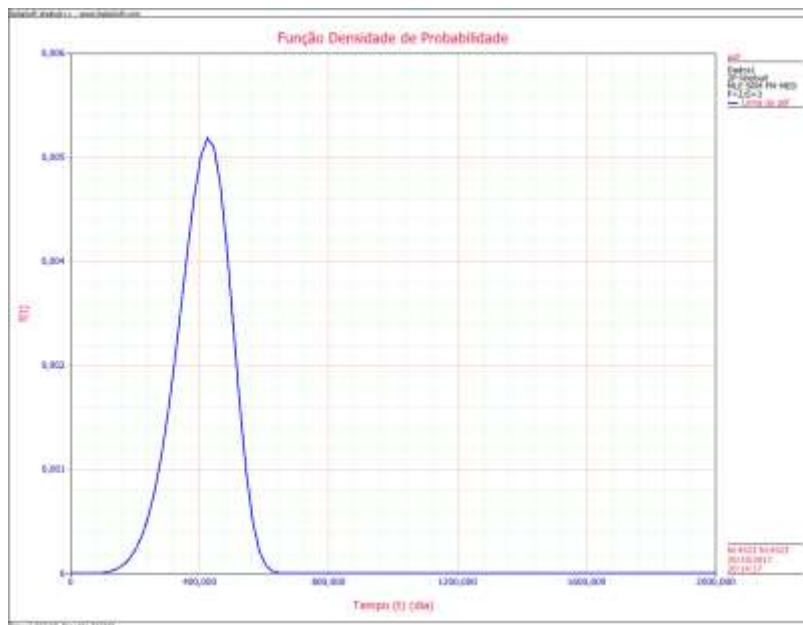
Figura 4.12 - Curva Confiabilidade x Tempo para acoplamentos da mesa de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

No gráfico da figura 4.12, pode-se observar a baixa densidade de falhas obtidas no período analisado e constatar a aproximação da curva pela análise da máxima verossimilhança.

Figura 4.13 - Função Densidade de Probabilidade dos acoplamentos da mesa de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

No gráfico da figura 4.13, fica evidenciada a PDF dos acoplamentos em operação no sistema, com comportamento de uma curva normal e concentração de falhas no intervalo de 350 a 450 dias, alinhado com o valor obtido para $\eta = 441$ dias.

4.4.4 Falha em guardas laterais

Cada seção da mesa de resfriamento possui guardas laterais fixas aos mancais dos rolos. Essas guardas também apresentam falhas durante operação, mesmo que com uma taxa pequena, que foram simuladas e os resultados podem ser observados na tabela 4.5.

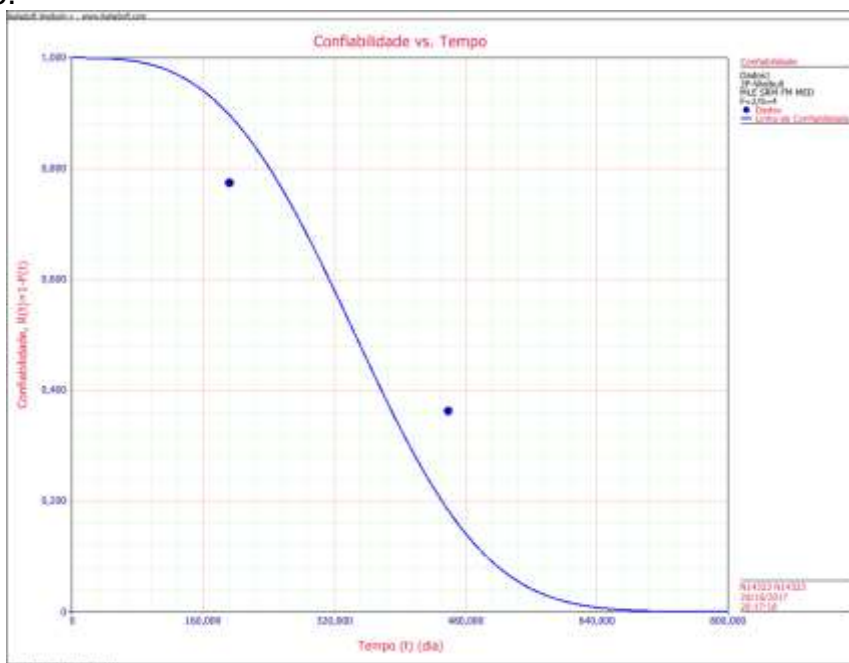
Tabela 4.5 - Parâmetros de confiabilidade das guardas laterais da mesa de resfriamento.

Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	3,154469
Eta (dia)	387,884441
Valor da LK	-12,776134
F \ S	2 \ 4
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=2,671789	CV Eta Beta=16,283208
CV Eta Beta=16,283208	Var-Eta=7659,246693

Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

O valor de forma $\beta = 3,15$ obtido representa comportamento de taxa de falha crescente nas guardas laterais e padrão característico de envelhecimento e desgaste, através de uma distribuição de Weibull bi paramétrica.

Figura 4.14 - Curva Confiabilidade x Tempo para guardas laterais da mesa de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

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.

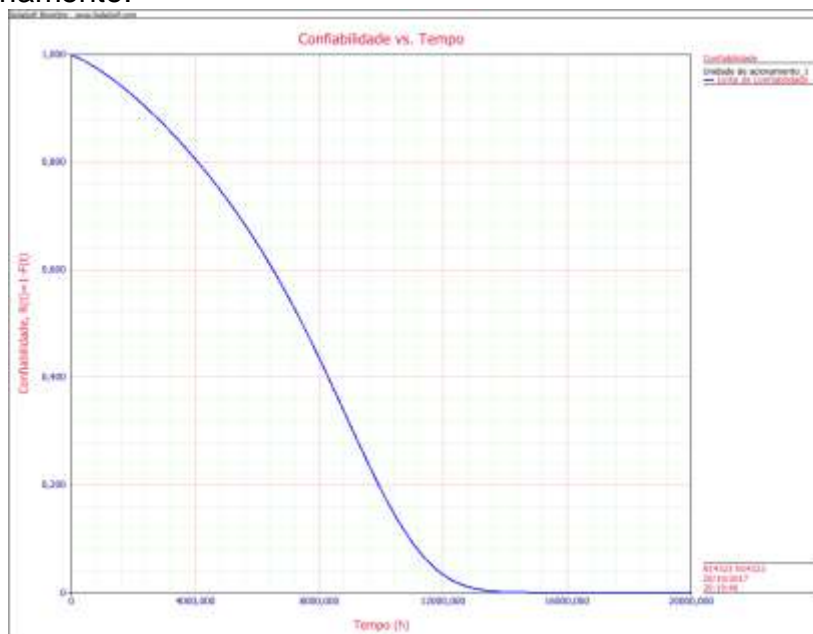
- Inseridas tarefas de inspeção semanal, frequência 7 dias, para cada componente do sistema. Conforme plano de manutenção em aplicação;
- Foram inseridos os tempos médios para manutenções corretivas, com parada de produção, conforme seguem.
 - Troca de motor: 1 hora
 - Troca de rolo: 4 horas
 - Troca de acoplamento: 0,5 horas
 - Solda de guardas laterais: 0,5 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 CMMS e as características da unidade de acionamento mostrada na figura 2.7, 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 4.16.

Figura 4.16 - Curva Confiabilidade x Tempo para a unidade de acionamento da mesa de resfriamento.

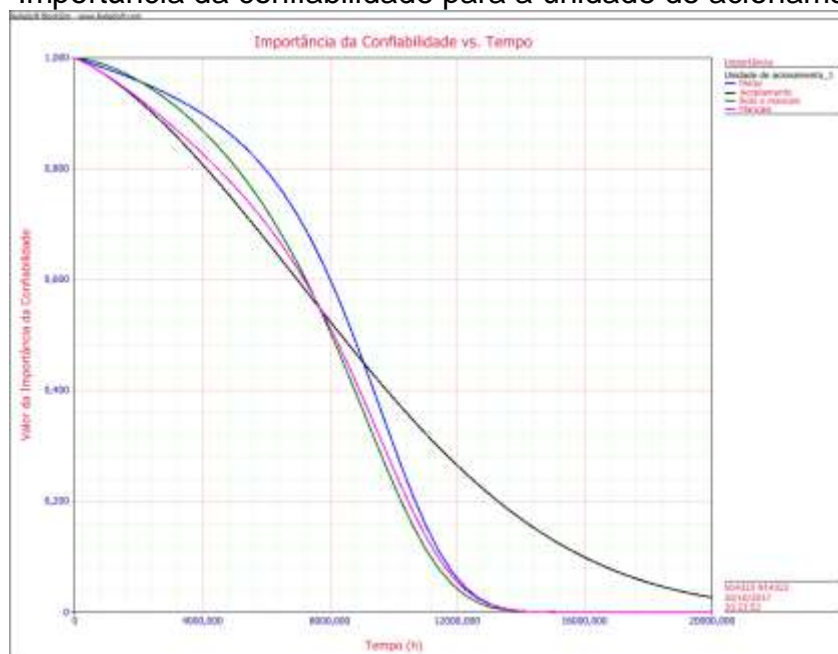


Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

A curva de confiabilidade da figura 4.16 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 8.600h, 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 4.17.

Figura 4.17 - Importância da confiabilidade para a unidade de acionamento.



Fonte: O autor - aplicação do software BlockSim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Através da 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 8600 horas, fica evidente ao analisarmos o gráfico da figura 4.17 que o motor é o componente que deve ser foco das análises dos modos de falhas e melhorias para aumento da confiabilidade do sistema.

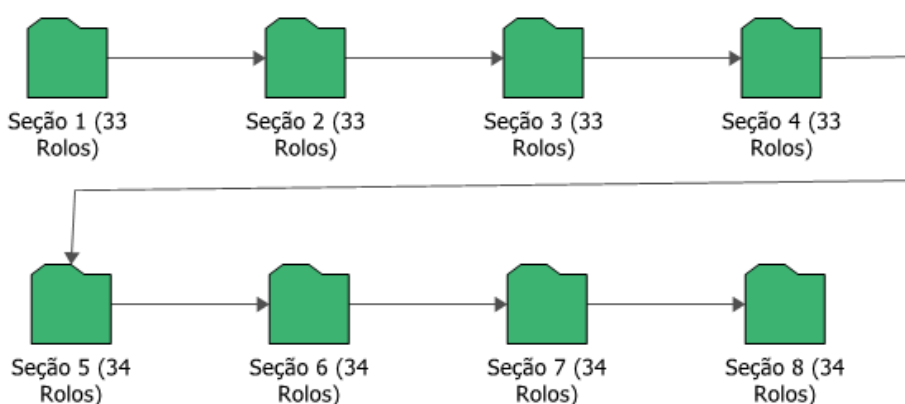
4.5.3 Modelamento e simulação da unidade de acionamento

O sistema de transporte e resfriamento de bobinas de aço, por projeto, possui 4 seções iniciais compostas por 33 unidades de acionamento, cada uma delas acionadas por um drive AC dedicado, e 4 seções finais com 34 unidades de

acionamento cada e também acionadas individualmente por um drive AC. No total, existem 268 unidades de acionamento operando em uma topologia série simples, sendo que a falha em qualquer uma delas acarreta 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 4.18.

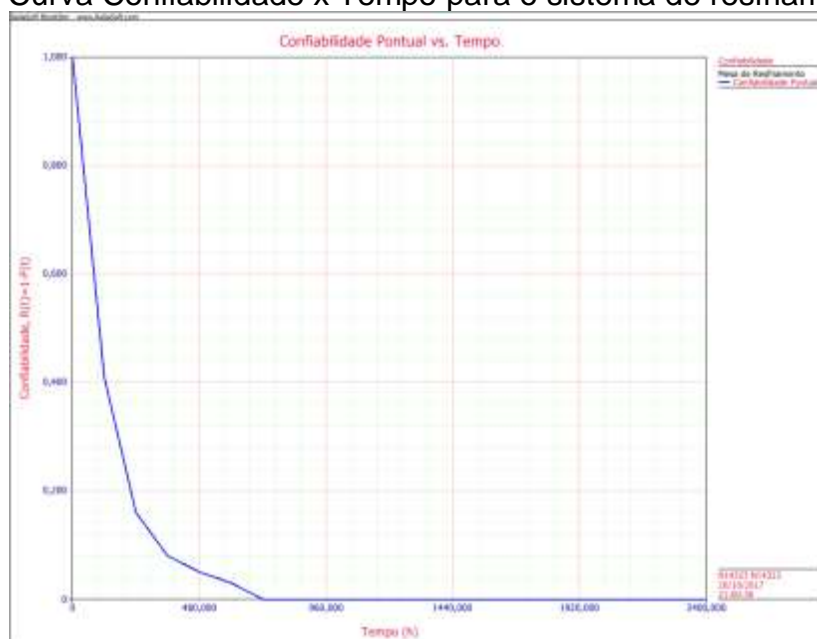
Figura 4.18 - Diagrama de blocos de confiabilidade do sistema de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software BlockSim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Os resultados do modelamento podem ser observados no gráfico da figura 4.19, para o aspecto confiabilidade no tempo.

Figura 4.19 - Curva Confiabilidade x Tempo para o sistema de resfriamento



Fonte: O autor - aplicação do software BlockSim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Mesmo com as unidades de acionamento possuindo confiabilidade relativamente alta, maior que 80% nas 4000h primeiras horas da missão, quando combinamos diversas unidades em série, sobretudo neste valor projetado para o sistema de resfriamento, podemos observar uma queda substancial da confiabilidade ao analisarmos todo o sistema, disponível na figura 4.19. 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, temos (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.

Na tabela 4.6, fica constatado através da simulação do comportamento do sistema que, para uma missão de 100 dias, ou 2400 horas, a disponibilidade média do sistema é de 96,32%, ou seja, para mais de 3% desta missão, ou cerca de 90 horas, o sistema não está disponível para operação, isso corresponde a 54 minutos de indisponibilidade por dia. Este valor prejudica fortemente a capacidade operacional do Laminador, e se torna evidente a necessidade de análise dos componentes do sistema e seus modos de falha, para identificação de melhorias e modificações com o foco em aumento da confiabilidade.

Tabela 4.6 - Parâmetros de confiabilidade do sistema de resfriamento.

Visão Geral do Sistema	
Geral	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,96322
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,073995
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,963751
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 2400:	0,91
Confiabilidade(2400):	0
Tempo Disponível (h):	2311,726904
Tempo Indisponível Total (h):	88,273096
Unidades	
Resumo das Métricas	
TMAPF (h):	137,461073
MTBF (Tempo Total) (h):	168,776371
MTBF (Tempo de Funcionamento) (h):	162,568699
MTBE (Tempo Total) (h):	132,963989
MTBE (Tempo de Funcionamento) (h):	128,073513
MTTM (h):	4,890476
MTTR (h):	6,117892
Resumo da Contagem do Evento	
Falhas do Sistema	
Quantidade Esperada de Falhas:	14,22
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	3,580475
Ações de MC	
Quantidade de MCs:	14,14
Tempo Indisponível da MC (h):	51,411969
Inspeções	
Quantidade de Inspeções:	0
Tempo Indisponível da Inspeção (h):	0
Ações de MP	
Quantidade de MPs:	3,83
Tempo Indisponível MP (h):	1,276667
Total	
Total de Eventos:	18,05

Fonte: O autor - aplicação do software BlockSim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

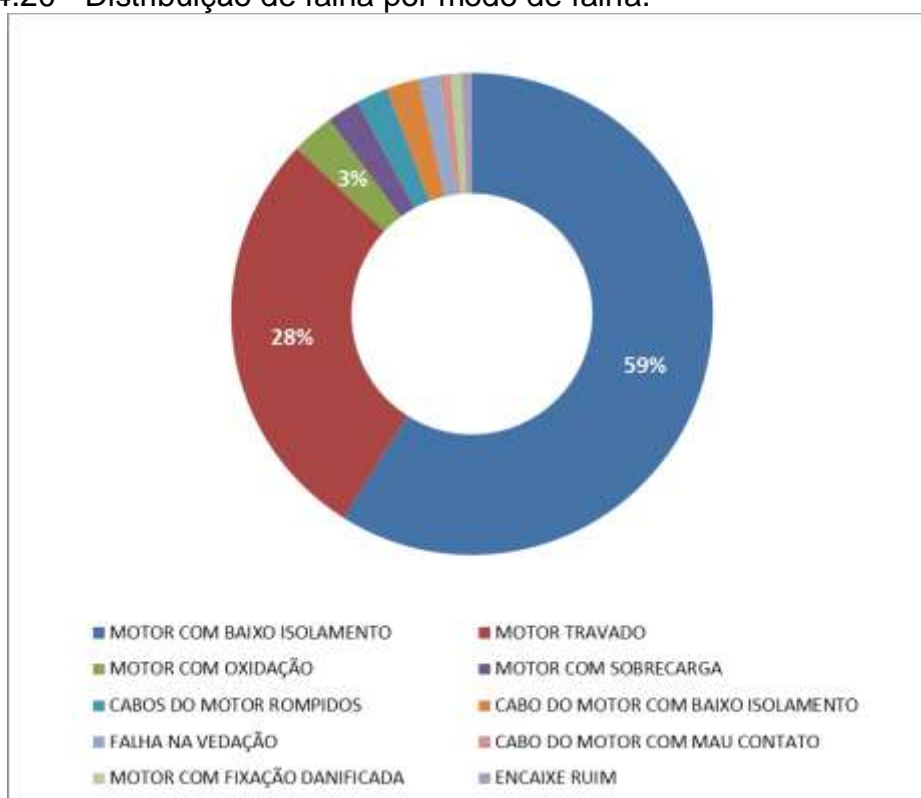
Analisando os resultados da simulação de todo o sistema disponível na tabela 4.6, pode-se observar o forte impacto das manutenções corretivas na disponibilidade, decorrente de falhas imprevistas nos equipamentos, que causam parada imediata de produção no Laminador. Além disso, as intervenções não previstas oneram os custos de manutenção, uma vez que fogem do controle da equipe de manutenção e demandam recursos e mão de obra emergencial para normalização do sistema. Também se pode verificar o alto tempo médio para reparo, que representa as características reais do sistema, a maior parte das falhas resulta

na necessidade de substituição de algum componente e conjunto, e estes itens, para este sistema, demandam um tempo elevado para substituição.

4.6 AVALIAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

Ao considerarmos 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 (2017), 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.

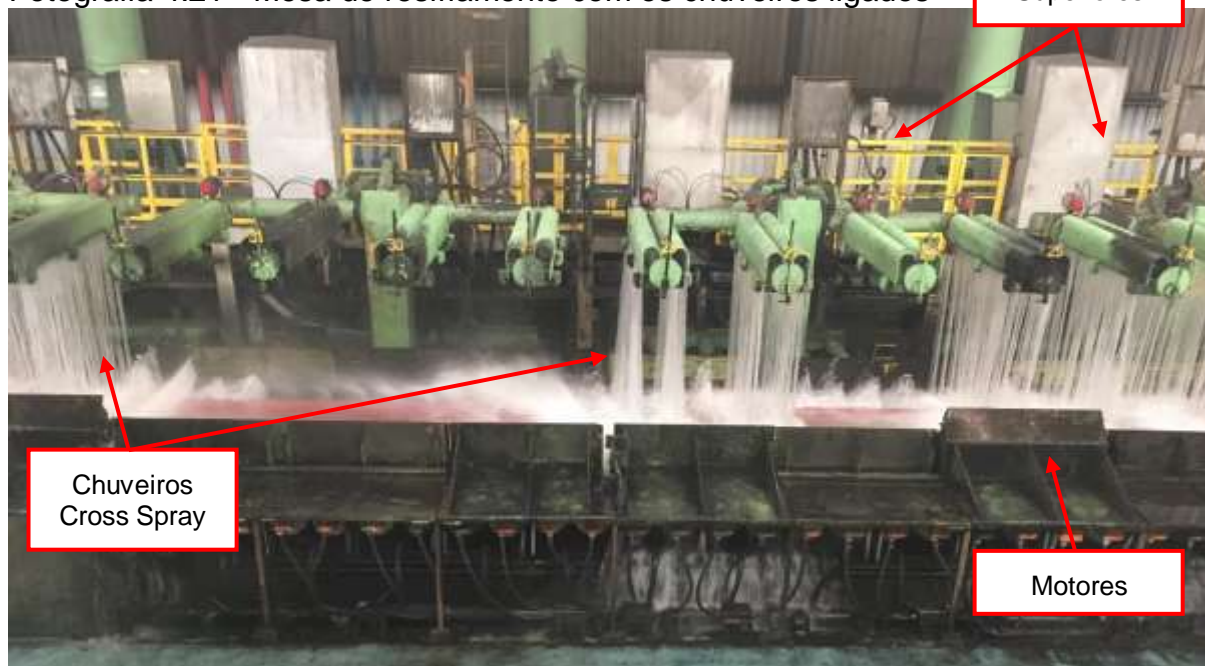
Figura 4.20 - Distribuição de falha por modo de falha.



Fonte: O autor (2017)

No período analisado, foram registradas 105 falhas em motores elétricos na mesa de resfriamento, sendo identificados diferentes modos de falha para as ocorrências, conforme detalhado no gráfico da figura 4.20. Estes modos de falha serão analisados mais detalhes, de forma que suas causas sejam identificadas, assim como as ações de melhoria para eliminá-los.

Fotografia 4.21 - Mesa de resfriamento com os chuveiros ligados



Fonte: WEG (2017)

Os modos de falha identificados nos motores elétricos da mesa de resfriamento estão fortemente correlacionados com o ambiente severo de operação destes motores, onde estão presentes fatores como alta umidade e vapor, elevada temperatura e presença de particulados metálicos. A fotografia 4.21 mostra em detalhe o contexto de operação dos componentes. Os chuveiros superiores são abertos individualmente de forma controlada, conforme estratégia de resfriamento, e permitem uma elevada vazão de água para criação de um fluxo laminar e contribuir para a troca térmica com a tira de aço. Entre as seções também estão presentes os chuveiros *cross spray*, que varrem a superfície da tira para retirar a água que já se encontra aquecida pela troca de calor com a tira. Os motores operam neste meio de extrema umidade e calor, com temperaturas acima de 100°C na estrutura.

Em conjunto com a equipe de engenharia interna e o fornecedor de motores, foram analisados os fenômenos por trás dos modos de falha dos motores e

propostas modificações no projeto para redução das falhas nos componentes. Nos próximos tópicos serão detalhados os fenômenos e contra medidas para eliminação das causas.

4.6.1 Motor com baixo isolamento

Durante operação normal na mesa de resfriamento, os motores frequentemente apresentam queda no isolamento para massa. Nas paradas de manutenção preventiva, são realizadas medições de isolamento em todos os motores do sistema, sendo que estas paradas acontecem a uma frequência de 20 em 20 dias aproximadamente. Depois de realizada a inspeção nos motores, são sinalizados quais equipamentos apresentaram impedância abaixo do limite mínimo estipulado de 200 M Ω , estes motores são retirados de operação e enviados para reparo em oficina. Entretanto, com uma frequência acima dos limites ótimos, ocorrem falhas no isolamento dos motores entre os intervalos das paradas programadas, de forma imprevista as proteções dos motores atuam, indicando falha no isolamento, e ocorre a parada imprevista de produção para substituição do equipamento que apresentou mau funcionamento.

Com a análise dos motores defeituosos pode-se constatar uma degradação acentuada dos fundos de ranhura dos motores. Este fenômeno pode ser atribuído ao ar altamente úmido que entra no motor, por este não ser hermeticamente fechado, e durante operação acaba por condensar na parte interna do motor e se alojar nos fundos de ranhura, estes por sua vez, absorvem esta umidade, o que ocasiona queda no isolamento em relação à massa do motor.

4.6.1.1 Proposta para eliminação da causa: água nos fundos de ranhura

Foi proposta a alteração da resina de isolamento dos fundos de ranhura, de maneira que preencha todo o espaço existente e evite o acúmulo de água. Assim como a alteração do material de isolamento das ranhuras, de maneira a aumentar a resistência contra água e umidade.

Fotografia 4.22 - Motor durante reparo, processo de pintura e rebobinamento.



Fonte: Arquivo próprio (2013)

A fotografia 4.22 mostra em detalhe as ranhuras existentes nos motores elétricos, estas acomodam os enrolamentos do estator do motor. Com a presença de água condensada internamente, as partículas adentram as ranhuras, se acumulam no fundo e são absorvidas pelo material isolante, causando queda no isolamento dos enrolamentos do motor para a massa, causando curto circuito quando a baixa impedância não é identificada antecipadamente, através de medições preditivas de resistência ôhmica. Com um material mais resistente a água, mesmo com o acúmulo de umidade nos fundos de ranhuras a resistência de isolamento do motor para massa não será reduzida a ponto de causar uma falha na operação do motor.

4.6.1.2 Proposta para eliminação da causa: acúmulo de água no motor

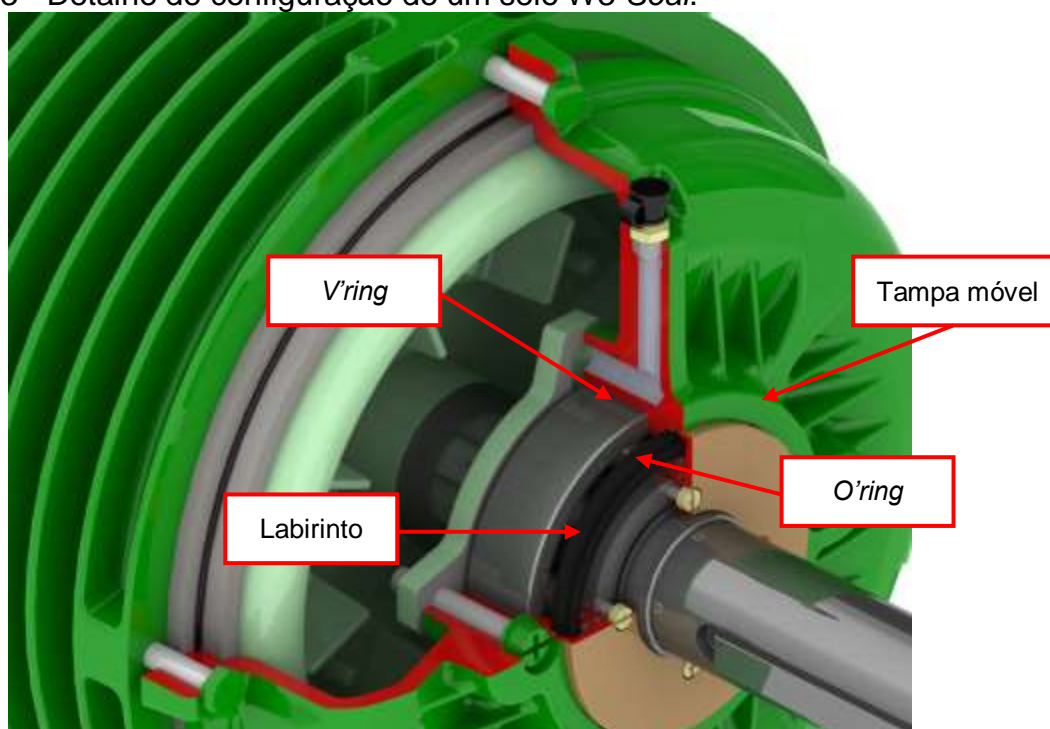
Em operação, principalmente nas regiões dos chuveiros *cross spray*, o contato dos motores com água é constante, demandando um eficiente sistema de selagem contra entrada de água e de drenagem da água que porventura adentrar no motor. Durante inspeções visuais foi possível verificar características de presença de água na parte interna de motores que apresentaram baixo isolamento. Desta forma, foram avaliadas duas possíveis causas para este acúmulo de água.

- O sistema de selagem do motor não é robusto o suficiente para bloquear a entrada de água no motor;
- O dreno do motor não é eficiente para retirar toda a água que se acumula no motor durante operação. Condição agravada com o envelhecimento do motor.

Frente a essas causas algumas modificações no projeto foram propostas, são elas:

- No caso do sistema de selagem, para o alcance da robustez necessária um sistema W3 Seal deverá ser instalado no motor para bloquear a passagem de água.

Figura 4.23 - Detalhe de configuração de um selo W3 Seal.



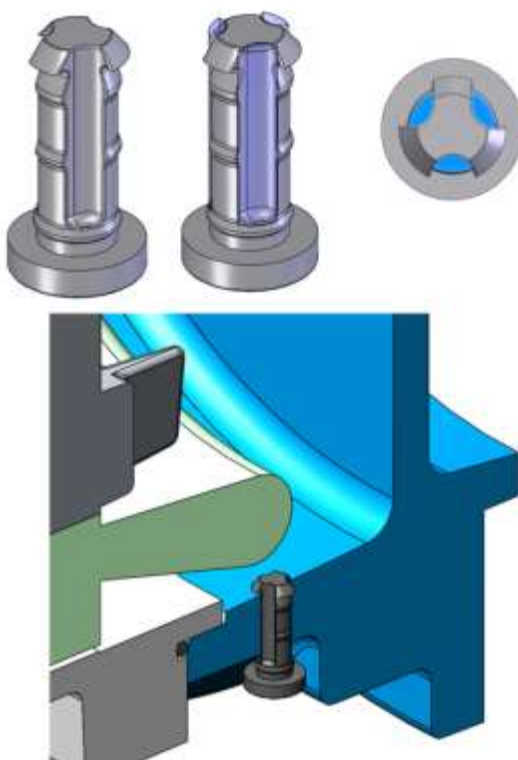
Fonte: WEG (2017)

Como detalhado na figura 4.23, este sistema possui 3 componentes diferentes para a selagem montado em um único pacote. Um anel *o'ring* faz a selagem do eixo do motor em relação ao selo, um *v'ring* fica em contato com a tampa móvel do selo e veda este componente em relação ao mancal fixo do motor e um labirinto é instalado entre

estes dois selos e preenchido com graxa, apara bloquear a passagem de água e contaminantes.

- Em relação ao dreno do motor, foi identificado que o dreno original, que possui um elemento poroso para realizar a interface entre o meio externo e interno, permitindo a drenagem da água acumulada, durante a vida do motor se degrada e sofre obstrução por contaminantes existentes na parte interna do motor, perdendo sua capacidade de realizar a função de drenagem da água condensada internamente no motor.

Figura 4.24 - Novo modelo de dreno proposto.



Fonte: WEG (2017)

Neste caso foi proposta a alteração do dreno por um modelo aberto, conforme detalhe da figura 4.24, o qual não possui elemento de filtragem e é mais robusto quanto a obstrução devido a acumulo de particulado. Com a aplicação deste dreno espera-se um

prolongamento da vida útil do dreno e consequente manutenção da função de escoamento da água acumulada no motor;

4.6.2 Motor travado

O segundo modo de falha predominante nos motores da mesa de resfriamento é o travamento do motor, causado principalmente por falha no rolamento traseiro.

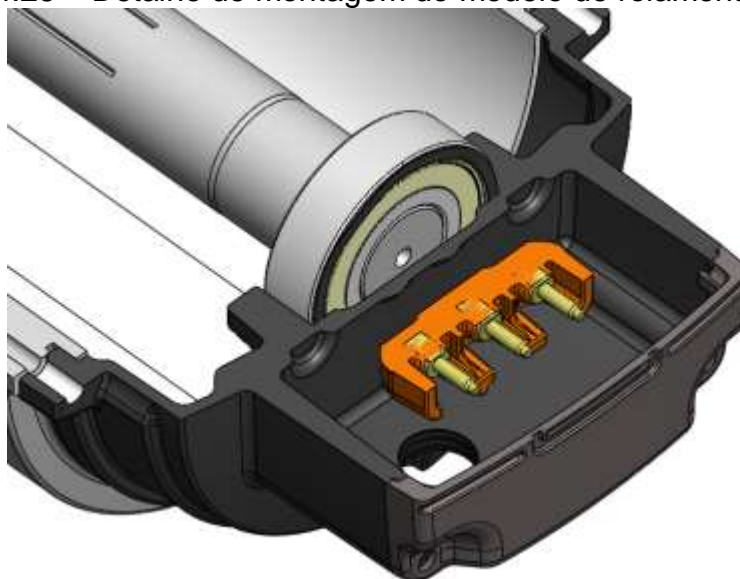
É conhecido que em aplicações onde há baixa carga radial na ponta de eixo os rolamentos trabalhem “leves”, ou seja, com carga insuficiente. Nesses casos, o arraste gerado pelo movimento das esferas pode ser maior que a força que mantém a pista externa fixa em relação à tampa. Dessa forma acontece o giro da pista externa (WEG, 2017). Quanto a alguns fatores que influenciam nesse fenômeno, temos: Carga radial, vibração, ajuste do rolamento na tampa, pré-carga axial.

Foi possível constatar nos motores em operação que estão presentes dois fatores que contribuem para esta falha, carga radial reduzida na ponta de eixo devido ao sistema de acoplamento elástico entre motor e rolos e elevados níveis de vibração.

4.6.2.1 Proposta para eliminação da causa

Para que seja possível contornar as falhas no rolamento traseiro do motor se faz necessária a avaliação da forma construtiva e tipo de rolamento utilizado, sendo que foi possível constatar uma baixa carga axial nos rolamentos durante operação, isso precisa ser considerado para a proposta de modificação do projeto.

Figura 4.25 – Detalhe de montagem do modelo de rolamento classe 63 proposto.



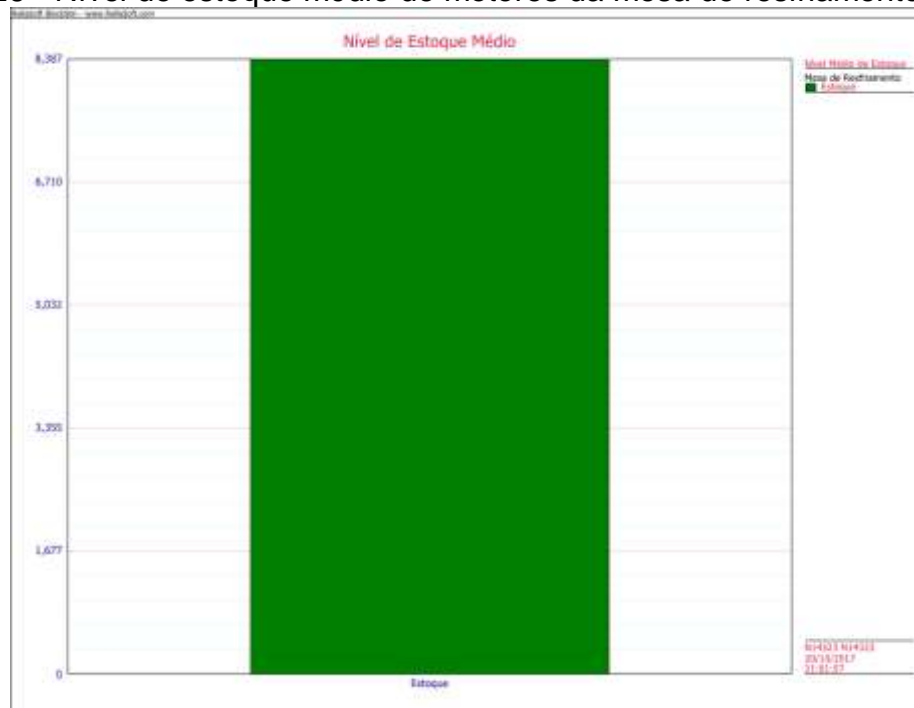
Fonte: WEG (2017)

Para eliminação deste tipo de falha a proposta é de que seja realizada a substituição do rolamento por um modelo mais robusto, foi proposto o rolamento de classe 63 (6309), com detalhe de montagem mostrado na figura 4.25. É esperado que, devido ao dimensional mais robusto a força necessária para ocasionar o giro da pista externa seja maior, dessa forma diminuindo a probabilidade desta pista girar e causar falha no rolamento e mancal. Ainda assim, é necessário recalcular a pré-carga axial nos rolamentos para garantir que a pista externa não seja deslocada durante operação.

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 resfriamento. O resultado desta simulação foi um estoque médio de 8 motores, conforme mostrado na figura 4.26, o que se mostrou próximo da realidade para o sistema, que é de 10 motores, sobretudo indicando uma otimização de estoque de 20%.

Figura 4.26 - Nível de estoque médio de motores da mesa de resfriamento.



Fonte: O autor - aplicação do software BlockSim, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

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 5 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 resfriamento é de aproximadamente 60 dias.

Também foi parametrizado um estoque de emergência, conforme realidade da área, que corresponde a 5 motores armazenados em um almoxarifado próximo ao equipamento, para reduzir o tempo gasto na mobilização do sobressalente em caso de necessidade de substituição emergencial. O software trata esse estoque de maneira que apenas seja utilizado quando um bloco do sistema solicita um sobressalente e este não está disponível no estoque (RELIASOFT, 2017).

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 da mesas de resfriamento, explicitando os diferentes meios e métodos utilizados para obtenção dos dados. Também foi mostrado em detalhe 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 e o fornecedor dos motores.

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 engajamento 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.

Outros estudos quantitativos de confiabilidade estão sendo desenvolvidos em diferentes subsistemas do Laminador de Tiras a Quente, com isso a disseminação do conhecimento e da cultura da confiabilidade está sendo fomentada em todas as equipes de manutenção. Na mesa de resfriamento um estudo de RCM foi recentemente implantado para a revisão dos planos de manutenção, desta forma a equipe da área se mostrou receptiva para o desenvolvimento deste estudo.

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 resfriamento foram focadas no componente com a maior importância para a confiabilidade neste sistema (RELIASOFT, 2017), o motor elétrico, e nos modos de falha com maior impacto na confiabilidade deste.

- Motor com baixo isolamento;
- Motor travado;

As modificações nos projetos dos motores aqui detalhadas foram desenvolvidas em conjunto com o fornecedor e engenharia interna. Um lote de 15 motores foi adquirido e instalado na mesa de resfriamento durante parada preventiva do Laminador. Os seguintes fatores foram propostos para serem acompanhados a fim de que seja verificada a eficácia das melhorias.

- Medição de resistência de isolamento;
- Medição de vibração;
- Inspeção nos rolamentos;

A estratégia de manutenção nos equipamentos da mesa de resfriamento foi objeto de análise de RCM qualitativo para a revisão de planos há poucos meses antes deste estudo, desta forma os novos planos de manutenção e inspeção foram levados em consideração para a verificação da eficácia das melhorias, em termos de frequência das ações, conforme mostra a tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Estratégia de inspeção da mesa de resfriamento.

Inspeção	Método	Parâmetro de controle	Ocasião	Frequência base
Preditiva	Medição	Isolamento	Parada	1
Preditiva	Medição de vibração	Vibração	Parada	8
Sensitiva	Visual	Condição	Rotina	7
Sensitiva	Estetoscópio	Vibração	Rotina	7

Fonte: O autor, com dados extraídos do SISMANA Planos, versão 19/06/2017 – 14h32 – ArcelorMittal Tubarão 2017.

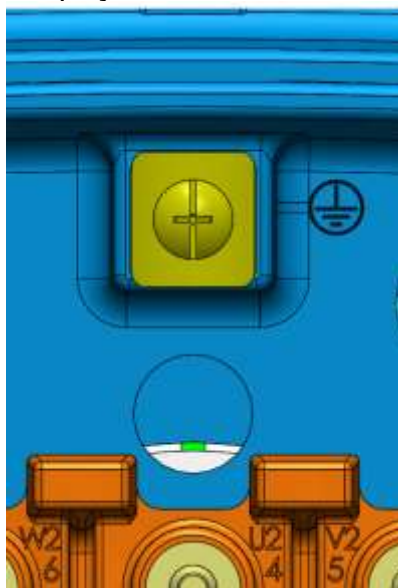
As paradas preventivas para manutenção da mesa de resfriamento são realizadas na mesma ocasião de parada do Laminador de Tiras a Quente, sendo que ocorrem em média a cada 20 dias. Considerando este intervalo, para calcularmos a frequência em dias para a realização das inspeções nas paradas, a frequência base deve ser multiplicada por 20. Ou seja, a inspeção preditiva de vibração nos motores é realizada em média com frequência de 160 dias, sendo que

uma inspeção sensível é realizada semanalmente e esta pode ser gatilho para uma inspeção preditiva extraordinária.

Como premissa para os testes, foi definido que os novos motores deveriam ser instalados nas regiões mais críticas da mesa de resfriamento, esta região é compreendida pelas primeiras posições da mesa de resfriamento, onde a tira de aço ainda está a uma temperatura de aproximadamente 800°C, e em posições próximas aos chuveiros *cross spray*, onde a presença de água é alta, criando um ambiente com muito vapor e umidade.

Para o modo de falha de giro da pista externa do rolamento, o chamado *fretting* – desgaste da pista do rolamento por deslizamento entre superfícies –, foi realizado um furo na tampa traseira do motor para que seja realizada a inspeção da posição da pista externa do rolamento, detalhe mostrado na figura 5.1.

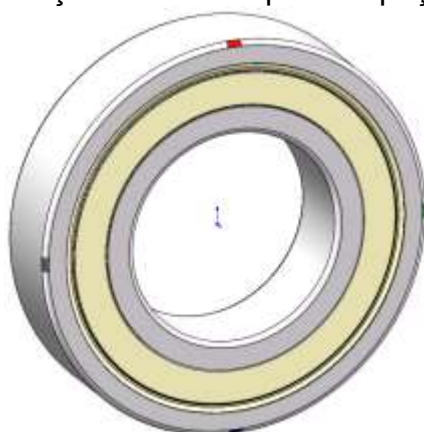
Figura 5.1 - Detalhe de furo para inspeção do rolamento.



Fonte: WEG (2017)

Os rolamentos montados terão marcações coloridas em posições defasadas em 90°, de forma a possibilitar por observação se há ocorrência de movimentação da pista externa e uma medida aproximada da taxa de deslocamento, conforme mostrado na figura 4.28.

Figura 5.2 - Rolamento com marcações coloridas para inspeção.



Fonte: WEG (2017)

Através deste método será possível constatar se a alteração do projeto dos rolamentos foi eficaz. Foi proposta uma tabela para organizar os resultados das inspeções e permitir a avaliação do comportamento dos motores em relação às modificações realizadas, conforme mostrado na figura 5.3.

Figura 5.3 - Exemplo de preenchimento de tabela para registro de inspeção.

IDENTIFICAÇÃO		Coloração visível na janela de inspeção					Resistência de isolamento (kΩ)	Nível de vibração (mm/s)		
Posição: XX		Vermelho	Verde	Azul	Preto	Nenhum		Vertical	Horizontal	Axial
Data	Hora									
01/01/2017	12:00	X					5.000	11,05	11,05	4,2
02/01/2017	13:00					X	4.000	8,5	8,5	3,7
03/01/2017	14:00			X			3.000	7,8	7,8	1,5
04/01/2017	15:00		X				3.000	11,05	11,05	2
05/01/2017	15:00		X				3.000	8,5	8,5	2,6
06/01/2017	15:00	X					3.000	7,8	7,8	4,1

Fonte: Adaptação de WEG (2017)

Os registros deverão ser realizados pelos inspetores responsáveis pela rota de inspeção da mesa de resfriamento, na frequência já definida pelos planos de manutenção, de forma a não demandar energia adicional para a aquisição dos dados, uma vez que a frequência definida pelo plano atende aos requisitos dos testes.

5.4 RESULTADOS

Após a implantação das melhorias em todos os motores da mesa de resfriamento, espera-se uma redução de 60% nas falhas em motores elétricos. Uma

vez que estas falhas correspondem a 43% do tempo de parada imprevista de produção causada pela mesa de resfriamento, podemos calcular o ganho esperado da forma mostrada na tabela da figura 5.4.

Figura 5.4 - Memorial de cálculo dos ganhos esperados.

Perda evitada - Produção (Custo Variável)		
Paradas / ano (antes)	19,8	horas
Redução de falhas projetada	60,0	%
	11,9	horas
Produtividade média	700	ton/hora
Perda de produção evitada	8.298	tons
Margem de contribuição (bobinas de aço)	120	R\$/ton
Perda financeira evitada / ano	995.788,08	R\$

Custos Fixos evitados (base 2016)		
Serviços	Antes	Depois
Reparo externo de motores	R\$ 374.557,73	R\$ 224.734,64
MO para troca de motores	R\$ 41.181,92	R\$ 24.709,15
Recursos para troca de motores (guindaste)	R\$ 4.481,87	R\$ 2.689,12
Subtotal	R\$ 420.221,52	R\$ 252.132,91
Materiais	Antes	Depois
Aquisição de motores	R\$ 397.044,45	R\$ 397.044,45
Materiais aplicado a reparo	R\$ 44.369,77	R\$ 26.621,86
Subtotal	R\$ 441.414,22	R\$ 423.666,31
Total	R\$ 861.635,74	R\$ 675.799,22
	Custo fixo Evitado	R\$ 185.836,52

Fonte: O autor, com dados extraídos do SAP NetWeaver, versão 7400.3.13.1130 – SAP Corporation 2017.

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 o mesmo valor de mão de obra para a substituição dos motores, independente do período em que ocorrer a falha;
- Considerado um valor médio de reparo de motores, independente do escopo a ser realizado em cada reparo e que a redução de 60% 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 elaborar algumas conclusões:

- O valor para aquisição de novos motores foi mantido constante pelo motivo do valor para aquisição dos motores modificados ser o mesmo do valor gasto para reposição de motores originais que apresentam falhas ou são substituídos preventivamente;
- 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 despendido para a substituição de motores defeituosos;

Como ganhos não mensuráveis do estudo, podemos citar:

- Maior engajamento das equipes de manutenção com a estratégia de manutenção baseada em estudos quantitativos;
- Liberação do tempo dos indivíduos envolvidos com a inspeção e manutenção dos equipamentos, podendo ser utilizado para estudos mais aprofundados dos sistemas e aquisição de conhecimento adicional;
- Aumento da satisfação dos empregados ao visualizarem a estabilidade e o aumento de produtividade do Laminador;

O desempenho do sistema deverá ser acompanhado continuamente, a fim de se obter os 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.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como possíveis trabalhos futuro neste sistema podem ser citados:

- A realização de uma análise quantitativa incluindo a taxa de sucesso nos reparos externos dos componentes do sistema. Neste trabalho, por falta de dados referentes a falhas oriundas de retrabalhos de reparos externos, esse parâmetro não pôde ser incluído na simulação;
- Uma análise de um método de operação do sistema que não seja predominantemente em série, estudando formas de permitir a retirada de um componente do sistema que apresentar falha e permitir que os demais supram a falta deste, compartilhando a carga de trabalho (*load sharing*);
- A realização de análises quantitativas deste tipo nos demais sistemas do Laminador de Tiras a Quente. Alguns trabalhos já estão sendo conduzidos para outros sistemas e este pode ser incorporado para se ter um modelamento completo de um Laminador.

REFERÊNCIAS

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

SICETEL. **Análise do Mercado do Aço**: 2016. Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos. São Paulo, 2016.

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: 08 set. 2017.

RELIASOFT. **Maintenability analysis**: Analyze Maintainability of complex systems. Disponível em: <http://www.reliasoft.com/BlockSim/maintainability_analysis.htm>. Acesso em: 15 out. 2017.

RELIASOFT. **Reliability Importance**. Disponível em: <http://www.reliawiki.org/index.php/Reliability_Importance>. Acesso em: 20 out. 2017.

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 Princípio 80/20**: O segredo de se realizar mais com menos. 1 ed. Rio de Janeiro: Rocco, 2000. 261 p.

BlockSim - Versão 11. Tucson, AZ, USA, Relisoft Corporation, 2017.

Weibull++ - Versão 11. Tucson, AZ, USA, Relisoft Corporation, 2017.

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. 2^a. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

NASA. **Nasa Reliability-Centered Maintenance Guide**. National Aeronautics and Space Administration. EUA, 2008

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

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION'S. **IEC 60812**: Analysis techniques for system reliability – procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). Suécia, 2006.

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.

WEG. **Estudo de customização de motores *Roller Table* para aplicação de laminação a quente do cliente Arcelormittal**. Relatório Técnico (10004852487). Santa Catarina, 2017.

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

SAP NetWeaver, versão 7400.3.13.1130. Newtown Square, PA, USA, SAP Incorporation, 2017.

SISMANA Planos, versão 19/06/2017 – 14h32. Serra, ES, Brasil, ArcelorMittal Tubarão, 2017.

APÊNDICE A – DADOS DE FALHAS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

Resumo simplificado da simulação Weibull e dados históricos de falhas em motores da mesa de resfriamento.

Tabela A1.1 - Relatório de simulação Weibull para motores.

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
Informações do Usuário	
Nome	N14323 N14323
Empresa	
Data	06/10/2017 00:00:00
Motores_CS\Dados1	
Código de Peça	
Versão	
Aplicativo	
Descrição	
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Ranqueando	MED
Beta	1,557805
Eta (dia)	688,056407
Valor da LK	-250,246574
F \ S	32 \ 80
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=0,056492 CV Eta Beta=-16,620080	
CV Eta Beta=-16,620080 Var-Eta=10986,086424	

Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Dados Brutos				
Número do Item	Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	Subst ID 1
1	1	S	234	Não
2	1	S	559	Não
3	1	S	498	Não
4	1	S	498	Não
5	1	S	571	Não
6	1	F	436	Não
7	1	S	339	Não
8	1	S	139	Não
9	1	F	188	Não
10	1	S	279	Não
11	1	S	339	Não
12	1	S	144	Não
13	1	S	219	CS
14	1	S	417	CS
15	1	S	417	CS
16	1	F	81	CS
17	1	S	498	CS
18	1	S	139	Não
19	1	F	140	Não
20	1	F	194	Não
21	1	F	242	Não
22	1	S	120	Não
23	1	F	261	Não
24	1	S	339	Não
25	1	S	339	Não
26	1	S	339	Não
27	1	F	185	Não
28	1	S	81	Não
29	1	F	486	Não
30	1	S	474	Não
31	1	F	371	CS
32	1	S	489	CS
33	1	S	166	Não
34	1	S	279	Não
35	1	F	116	Não
36	1	S	298	Não
37	1	F	200	Não
38	1	S	339	Não
39	1	S	498	Não
40	1	S	185	Não
41	1	F	267	CS
42	1	S	234	CS
43	1	S	385	Não
44	1	F	388	Não
45	1	S	498	Não
46	1	S	455	Não
47	1	S	313	Não
48	1	S	139	Não
49	1	S	234	Não
50	1	S	234	Não
51	1	S	234	Não
52	1	S	578	Não
53	1	S	200	Não

54	1	S	417	Não
55	1	F	163	Não
56	1	S	279	Não
57	1	F	138	Não
58	1	S	362	Não
59	1	F	39	Não
60	1	S	339	CS
61	1	F	205	CS
62	1	S	360	Não
63	1	S	450	Não
64	1	S	252	Não
65	1	S	234	Não
66	1	S	257	Não
67	1	F	237	CS
68	1	S	219	Não
69	1	S	234	Não
70	1	F	79	Não
71	1	F	167	Não
72	1	S	467	Não
73	1	S	339	CS
74	1	F	85	CS
75	1	S	157	Não
76	1	S	292	Não
77	1	F	371	Não
78	1	F	169	Não
79	1	F	284	Não
80	1	S	139	Não
81	1	F	247	Não
82	1	S	455	Não
83	1	S	455	Não
84	1	S	208	Não
85	1	S	398	Não
86	1	S	515	Não
87	1	S	333	Não
88	1	S	88	Não
89	1	S	256	Não
90	1	S	466	Não
91	1	S	219	Não
92	1	F	240	Não
93	1	F	213	Não
94	1	F	243	Não
95	1	S	339	Não
96	1	S	498	Não
97	1	S	515	Não
98	1	S	339	Não
99	1	S	218	Não
100	1	S	385	Não
101	1	S	417	Não
102	1	S	175	CS
103	1	S	200	Não
104	1	S	234	Não
105	1	S	234	Não
106	1	S	387	Não
107	1	F	88	Não
108	1	F	85	Não
109	1	F	237	Não
110	1	S	339	CS
111	1	S	339	CS
112	1	S	298	CS

Resumo simplificado da simulação Weibull e dados históricos de falhas em acoplamentos da mesa de resfriamento.

Tabela A1.2 - Dados de falhas em acoplamentos da mesa de resfriamento.

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
Informações do Usuário	
Nome	N14323 N14323
Empresa	
Data	06/10/2017 00:00:00
Acoplamento \ Dados 1	
Código de Peça	
Versão	
Aplicativo	
Descrição	
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	5,952168
Eta (dia)	441,813243
Valor da LK	-11,662933
F \ S	2 \ 3
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=10,693909	CV Eta Beta=49,314064
CV Eta Beta=49,314064	Var-Eta=2982,252619

Dados Brutos	Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	Subset ID 1
1	1	F	323	
2	1	F	489	
3	1	S	122	
4	1	S	205	
5	1	S	180	

Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Resumo simplificado da simulação Weibull e dados históricos de falhas em mancais dos rolos da mesa de resfriamento.

Tabela A1.3 - Dados de falhas em mancais dos rolos da mesa de resfriamento.

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
Informações do Usuário	
Nome	N14323 N14323
Empresa	
Data	06/10/2017 00:00:00
Mancais dos Rolos \ Dados1	
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Ranqueando	MED
Beta	2,660886
Eta (dia)	651,990638
Valor da LK	-23,653901
F \ S	3 \ 17
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=1,312706	CV Eta Beta=-147,008485
CV Eta Beta=-147,008485	Var-Eta=36476,165401

Dados Brutos	Condição	Tempo até	Subset ID 1
Número do Item	F ou S	F ou S (dia)	
1	S	312	
2	S	104	
3	S	104	
4	S	104	
5	S	104	
6	F	184	
7	S	202	
8	F	284	
9	S	130	
10	S	104	
11	S	558	
12	S	386	
13	S	505	
14	S	258	
15	S	348	
16	S	478	
17	F	436	
18	S	167	
19	S	161	
20	S	274	

Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.

Resumo simplificado da simulação Weibull e dados históricos de falhas em guardas laterais da mesa de resfriamento.

Tabela A1.4 - Dados de falhas em guardas laterais da mesa de resfriamento.

Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
Informações do Usuário	
Nome	N14323 N14323
Empresa	
Data	06/10/2017 00:00:00
Guardas Laterais \Dados1	
Código de Peça	
Versão	
Aplicativo	
Descrição	
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Ranqueando	MED
Beta	3,154469
Eta (dia)	387,884441
Valor da LK	-12,776134
F \ S	2 \ 4
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=2,671789	CV Eta Beta=16,283208
CV Eta Beta=16,283208	Var-Eta=7659,246693

Dados Brutos			
Número do Item	Condição F ou S	Tempo até F ou S (dia)	Subset ID 1
1	F	459	
2	F	192	
3	S	55	
4	S	56	
5	S	227	
6	S	51	

Fonte: O autor - aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017.