

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

BRUNO BERMUDES CRASTO

**ANÁLISE DE INTERVALOS ÓTIMOS DE MANUTENÇÃO
PREVENTIVA DA TESOURA DE PONTAS DA CADEIRA DE
LAMINAÇÃO DE BOBINAS DA ARCELORMITTAL TUBARÃO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2019

BRUNO BERMUDES CRASTO

**ANÁLISE DE INTERVALOS ÓTIMOS DE MANUTENÇÃO
PREVENTIVA DA TESOURA DE PONTAS DA CADEIRA DE
LAMINAÇÃO DE BOBINAS DA ARCELORMITTAL TUBARÃO**

Monografia apresentada como requisito parcial para 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

CURITIBA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE INTERVALOS ÓTIMOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA TESOURA DE PONTAS DA CADEIRA DE LAMINAÇÃO DE BOBINAS DA ARCELORMITTAL TUBARÃO

por

BRUNO BERMUDES CRASTO

Esta monografia foi apresentada em 31 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Professor Orientador - UTFPR

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

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

DEDICATÓRIA

A minha mãe Lúcia, pelo exemplo de caráter e por me ensinar o que é se entregar totalmente aquilo que se ama.

À Larissa, pelo carinho e cumplicidade que me inspira e me motiva a crescer.

AGRADECIMENTOS

Certamente nenhum trabalho com a extensão semelhante à deste poderia ser realizado único e exclusivamente com os meus esforços. Deixo aqui meus agradecimentos a todos que contribuíram nesta caminhada.

Primeiramente a Deus, pela força e sabedoria concedida.

Ao meu orientador Marcelo, pelos sábios conselhos e diretrizes para alcançar um resultado otimizados.

A todo corpo docente da UTFPR pelos conhecimentos disseminados ao longo da especialização, fundamentais para sustentação deste trabalho.

Aos meus colegas da Arcelor, que contribuíram com toda sua experiência e que me auxiliaram no esclarecimento, em especial ao Engenheiro Fabiano Santana que foi como um segundo orientador.

RESUMO

CRASTO, Bruno Bermudes. **ANÁLISE DE INTERVALOS ÓTIMOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA TESOURA DE PONTAS DA CADEIRA DE LAMINAÇÃO DE BOBINAS DA ARCELORMITTAL TUBARÃO.** 2019. 46. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Diante da necessidade das empresas adotarem cada vez mais a melhoria continua como uma premissa para sua sobrevivência no mercado, as ferramentas de gestão de ativos estão consolidando seu espaço dentro do mundo corporativo. Uma importante fase do ciclo de vida do ativo é a sua manutenção, e quanto mais assertiva forem as decisões nesse período maior competitividade e resultados serão alcançados. Este trabalho visa justamente apresentar uma metodologia de definição de intervalos ótimos para manutenção preventivas, baseada em modelos probabilísticos de confiabilidade e manutenibilidade e a interação entre os custos de atividades corretivas e preventivas, bem como também apresentar os seus resultados aplicados para a Tesoura de Pontas do Laminador de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão.

Palavras-chave: Engenharia de confiabilidade. Gestão de Ativos. Intervalos ótimos. Preventivas.

ABSTRACT

CRASTO, Bruno Bermudes. **ANÁLISE DE INTERVALOS ÓTIMOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA TESOURA DE PONTAS DA CADEIRA DE LAMINAÇÃO DE BOBINAS DA ARCELORMITTAL TUBARÃO.** 2019. 46. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Given the need for companies to increasingly embrace continuous improvement as a premise for their survival in the marketplace, asset management tools are consolidating their space within the corporate world. An important phase of the asset's life cycle is its maintenance, and the more assertive the decisions in this period, the greater competitiveness and results will be achieved. This work aims to present a methodology for defining optimal intervals for preventive maintenance, based on probabilistic models of reliability and maintainability and the interaction between the costs of corrective and preventive activities, as well as presenting their results applied to the ArcelorMittal Tubarão Hot Strip Mill.

Palavras-chave: Reliability Engineering. Asset management. Optimum maintenance intervals. Preventive.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Percentual médio da Disponibilidade dos equipamentos por setor	12
Figura 2 – Custos de Manutenção	12
Figura 3 – Custos anuais da Manutenção	13
Figura 4 – Protocolo de Pesquisa	14
Figura 5 – Vista área ArcelorMittal Tubarão	16
Figura 6 – Fluxograma Produtivo ArcelorMittal Tubarão	17
Figura 7 – Processo Laminador de Tiras a Quente	18
Figura 8 – Resumo dos conceitos básicos de confiabilidade	22
Figura 9 – Valores para $\Gamma(\alpha)$	24
Figura 10 – Resumo das distribuições contínuas comumente utilizadas e suas funções.....	28
Figura 11 – Configuração de confiabilidade em série	29
Figura 12 – Configuração de confiabilidade em paralelo	30
Figura 13 – RDB combinado paralelo e série.....	31
Figura 14 – Comparação das funções básicas de confiabilidade e manutenibilidade	32
Figura 15 – Relação entre disponibilidade instantânea, média e em regime permanente	34
Figura 16 – Tempo Ótimo	37
Figura 17 – Diagrama de Blocos do Laminador de Tiras a Quente.....	38
Figura 18 – Indicadores da análise RAM do Laminador.....	39
Figura 19 – Diagrama de blocos do Trem Acabador.....	39
Figura 20 – Indicadores da análise RAM dos 16 equipamentos mais críticos do Laminador	40
Figura 21 – Exemplo modelagem LDA entrevista de confiabilidade	41
Figura 22 – Exemplo modelagem LDA entrevista de confiabilidade	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos ótimos de substituição dos LRU's da Tesoura de Pontas	43
-------------------------------------------------------------------------------	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA DA PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	13
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVA.....	14
1.4	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	15
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	EMPRESA E EQUIPAMENTO ANALISADO.....	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1	TEORIAS DA CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE (RAM)	19
3.1.1	Teoria da Confiabilidade.....	19
3.1.2	Modelos de distribuições estatísticas contínuas utilizadas em análises de confiabilidade.....	20
3.1.3	Confiabilidade de Sistemas	28
3.1.4	Teoria da Manutenibilidade	32
3.1.5	Teoria da disponibilidade.....	33
3.2	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)	35
3.3	SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	35
3.4	CÁLCULO DOS TEMPOS ÓTIMOS.....	36
4	DESENVOLVIMENTO.....	38
4.1	IDENTIFICAÇÃO DA TESOURA DE PONTOS COMO OBJETO DE ESTUDO.....	38
4.2	LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE DOS LRU'S DA TESOURA DE PONTAS	40
4.3	CÁLCULO DO TEMPO ÓTIMO DE MANUTENÇÃO DA TESOURA DE PONTAS	42
5	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA DA PESQUISA

Em um cenário econômico que cada vez mais exige das corporações empenho na otimização de seus processos para manter competitividade e sobrevivência no mercado, torna-se fundamental a utilização de uma política de gestão de ativos.

De acordo com a ABNT NBR ISO 55000:2014 referente a gestão de ativos, um ativo é um item, algo ou entidade que tem valor ou potencial para uma organização. O valor do ativo se tornará diverso de instituição para instituição, podendo ser tangível ou intangível.

A norma ainda complementa que o controle eficaz e a governança dos ativos pelas organizações são essenciais para obter valor por meio do gerenciamento de riscos e oportunidades, com o intuito de alcançar um equilíbrio entre custo, risco e desempenho. A gestão de ativos permite a correta tomada de decisão para o gerenciamento de um ativo durante todas as fases de seu ciclo de vida, desde a concepção até o descarte, trazendo benefícios como: desempenho financeiro, decisões assertivas, redução de risco, melhoria de imagem, sustentabilidade organizacional, eficiência e eficácia.

Algumas áreas temáticas englobadas pela gestão de ativos, mas não limitadas a, são: gestão de dados, gestão de riscos, gestão da qualidade, gestão ambiental, desenvolvimento sustentável, qualificação e avaliação de pessoal, gestão de projetos, processo de comissionamento, custo do ciclo de vida, manutenção e dependabilidade (disponibilidade, confiabilidade, manutenibilidade e apoio da manutenção) (ABNT NBR ISO 55000:2014 – Gestão de ativos).

Dentro do universo da gestão de ativos, levando-se o foco para a gestão da manutenção e dependabilidade, segundo o documento nacional de 2017, realizado pela Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de ativos (ABRAMAN) a cada 2 anos, a média geral da disponibilidade dos equipamentos é de 87%, conforme mostra a figura 1. Sendo que dos 13% de indisponibilidade média, 8% são provenientes da manutenção.

Figura 1 – Percentual médio da Disponibilidade dos equipamentos por setor

Setores	Disponibilidade dos Equipamentos (%)	Indisponibilidade Devido a Manutenção (%)
Açúcar e Alcool, Alimentos e Bebidas	81%	26%
Aeronáutico e Automotivo	82%	6%
Eletroeletrônicos - Energia Elétrica	95%	4%
Químico e Sanamento	88%	13%
Mineração e Siderúrgico	88%	8%
Petróleo e Petroquímico	88%	2%
Papel e Celulose e Plástico	92%	3%
Predial e Prestação de Serviços (EQ e MO)	83%	7%
Máquinas e Equipamentos - Metalúrgico	90%	4%
Média Geral	87%	8%

Fonte: ABRAMAN, 2017.

O mesmo documento revela que em média 4% de todo faturamento bruto das organizações é direcionado para gastos com manutenção, conforme pode-se observar na figura 2.

Figura 2 – Custos de Manutenção

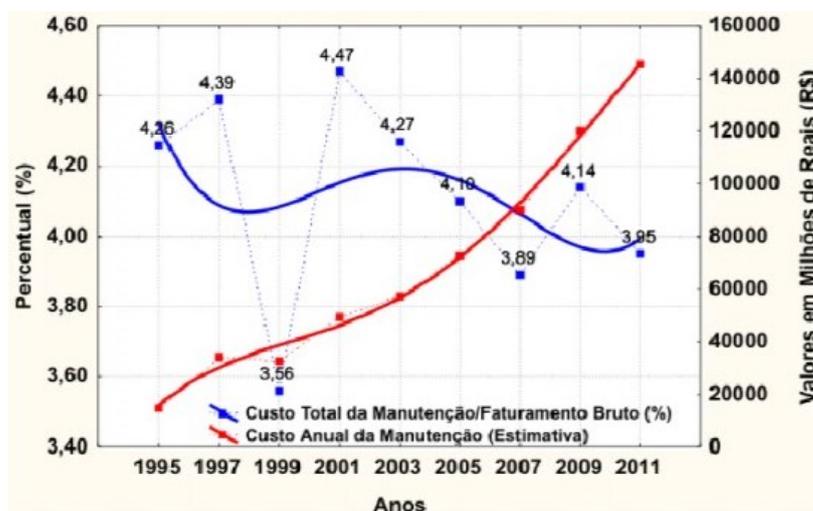
Setores	Custo Manutenção / Faturamento (%)
Açúcar e Alcool, Alimentos e Bebidas	4%
Aeronáutico e Automotivo	3%
Eletroeletrônicos - Energia Elétrica	7%
Químico e Sanamento	5%
Mineração e Siderúrgico	5%
Petróleo e Petroquímico	4%
Papel e Celulose e Plástico	3%
Predial e Prestação de Serviços (EQ e MO)	4%
Máquinas e Equipamentos - Metalúrgico	3%
Média Geral	4%

Fonte: ABRAMAN, 2017.

Em versão anterior do documento, do ano de 2015, pode-se verificar um aumento no efetivo de manutenção em relação ao efetivo total das corporações de 5%, em comparação com o documento anterior 2013, o que mostra um aumento da percepção da relevância da manutenção dos ativos pelas empresas.

No levantamento de 2011, estimou-se que os gastos com manutenção chegaram em valores absolutos de 145 bilhões de reais anual, 40x maior do que os gastos realizados em 1995, conforme figura 3.

Figura 3 – Custos anuais da Manutenção



Fonte: ABRAMAN, 2011.

Portanto, é importantíssimo uma política de gestão de ativos com enfoque na manutenção, com diretrizes que assegurem alta performance dos equipamentos em disponibilidade e confiabilidade, e que ainda reduza seus custos, trazendo competitividade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise do intervalo ótimo de manutenção da tesoura de pontas da cadeira de laminação do Laminador de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão, utilizando-se da metodologia de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade e de variáveis como desempenho, custo e risco operacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Selecionar o equipamento a ser estudado.
- Definir metodologia para coleta de dados.
- Realizar análise RAM do Laminador de tiras a quente.

- Definir modelos probabilísticos para confiabilidade e manutenibilidade dos itens da Tesoura de Pontas.

1.3 JUSTIFICATIVA

O empenho das empresas na busca pela excelência da manutenção é altamente viável economicamente uma vez que os esforços desenvolvidos para aumentar a disponibilidade dos equipamentos em 0,5%, 1% ou 1,5% são quase insignificantes perto do potencial de aumento de receita que estes estudos podem agregar ao negócio. Como demonstrado no tópico 1.1, os valores financeiros envolvendo estas empresas estão na casa dos milhões.

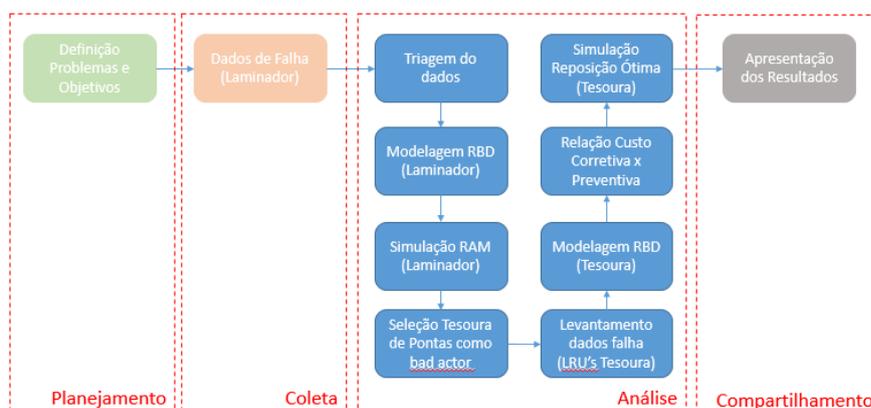
Para tanto é necessário o estabelecimento de uma estratégia que identifique tais oportunidades de melhoria na disponibilidade dos equipamentos, mapeando os principais atores responsáveis pela baixa performance do processo produtivo.

O objeto de estudo deste trabalho passou por esta triagem e, portanto, apresenta potencial de retorno financeiro para a organização.

1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

O protocolo de pesquisa do presente trabalho visa apresentar os passos das atividades realizadas para a definição dos intervalos ótimos de manutenção preventiva, visando uma melhor compreensão do seu desenvolvimento.

Figura 4 – Protocolo de Pesquisa



A fase de planejamento do projeto engloba a parte introdutória, a introdução, os objetivos gerais e específicos e toda a revisão da literatura referente ao tema da pesquisa.

A coleta de dados refere-se a como serão coletados os dados, que neste caso serão levantados através da extração de relatórios do sistema de gestão da manutenção da ArcelorMittal Tubarão bem como da ferramenta de acompanhamento da produção do Laminador de Tiras a quente.

Em relação a etapa de análise, este trabalho foi dividido em duas fases.

A fase 1 contemplou uma triagem dos dados entre a duas fontes de dados e posteriormente a realização de uma simulação RAM do Laminador de Tiras a quente com a modelagem de curvas de confiabilidade e manutenibilidade, utilizando a metodologia de LDA, para a identificação do equipamento a ser estudado.

Na fase 2, com a definição do equipamento a ser estudado, foram levantadas variáveis para cada item manutenível do equipamento, por meio de entrevistas com especialistas, com o intuito da realização da modelagem das curvas de confiabilidade e manutenibilidade. Foi definida uma relação entre os custos de manutenção preventiva e corretiva e posteriormente realizado uma simulação de reposição ótima para identificação do intervalo ótimo de troca dos componentes do equipamento selecionado.

Na etapa de compartilhamento, por fim, foram apresentados os resultados encontrados da simulação.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta o objeto do trabalho, tornando mais claro para o leitor o equipamento no qual o estudo foi desenvolvido.

O Capítulo 3 demonstra todo referencial teórico que fundamenta a análise desenvolvida.

O Capítulo 4 detalha o desenvolvimento da análise RAM realizada bem como as entrevistas de confiabilidade e o desenvolvimento do intervalo ótimo.

Por fim o Capítulo 5 contém os resultados obtidos e as considerações finais deste trabalho.

2 EMPRESA E EQUIPAMENTO ANÁLISADO

Neste capítulo, com o objetivo de esclarecer o leitor a respeito do objeto estudado, será apresentado com maiores detalhes informações da Tesoura de Pontas e do seu contexto operacional.

Presente em mais de 60 países, o grupo ArcelorMittal é o maior fornecedor mundial de aço bruto. No universo latino-americano, a ArcelorMittal Brasil, produtora de aços longos e planos, apresenta capacidade produtiva anual de 13 milhões de toneladas de aço e opera 27 unidades.

O processo produtivo de aços planos inicia-se na ArcelorMittal Tubarão, uma unidade de produção integrada, localizada na Região Metropolitana da Grande Vitória, no Espírito Santo. Apresenta capacidade produtiva anual de 7,5 milhões de toneladas de aço em placas e bobinas a quente e emprega diretamente mais de 4,5 mil pessoas. Inserida dentro de um complexo logístico, contando com infraestrutura portuária, ferroviária e rodoviária, atende os mercados internos e externos.

Figura 5 – Vista área ArcerlorMittal Tubarão



Fonte: Site ArcerlorMittal Tubarão, 2019.

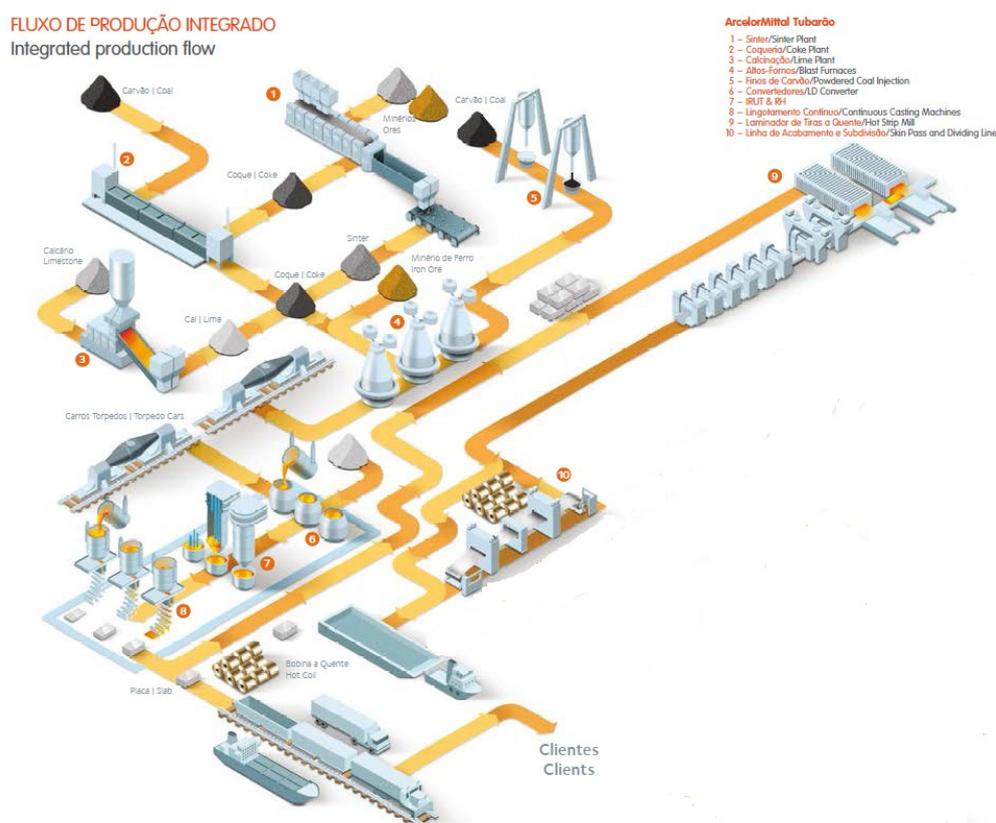
Conforme a figura 6, o processo produtivo começa com a Calcinação, Sinterização e Coqueria, produzindo as matérias primas de cal, sinter e coque respectivamente. A Coqueria a partir da destilação da mistura de carvões minerais

promove a transformação destes em coque. A Sinterização, com a aglomeração a quente de materiais finos, produz o sinter. A calcinação através da decomposição térmica transforma o calcário em cal virgem.

Nos Altos Fornos ocorrem reações químicas e de redução com estas matérias primas e outras adições como pelota e minério de ferro, resultando assim o ferro gusa, principal matéria prima do aço. Este ferro gusa prosseguirá para a Aciaria, transportado pelos carros torpedos, e será transformado a partir do sopro de oxigênio em aço líquido. Este aço líquido será posteriormente resfriado de maneira controlada nas máquinas de Lingotamento Contínuo, podendo antes passar por beneficiamentos nos refinamentos primários e secundários. Assim são produzidas as placas de aço.

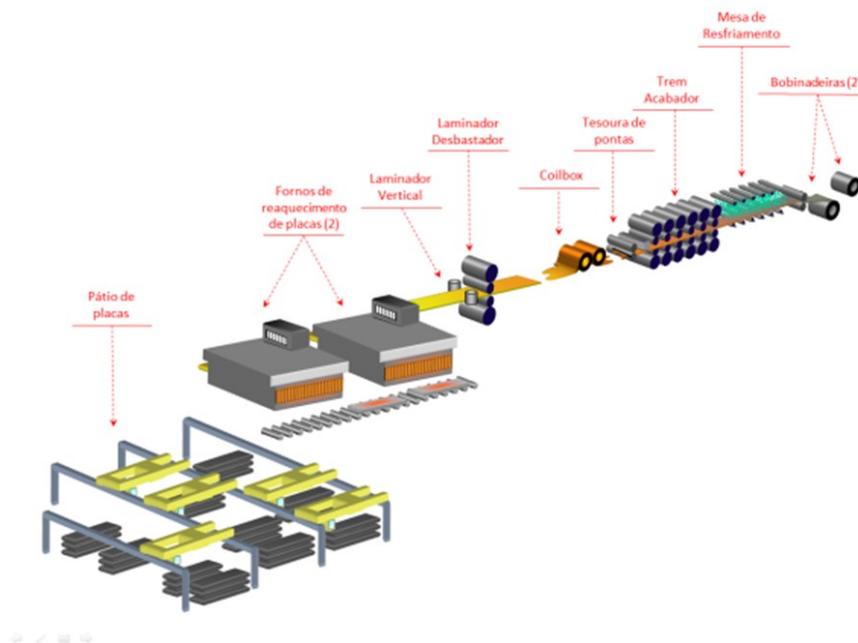
As placas de aço por sua vez podem ser inspecionadas e tratadas na área de condicionamento de placas e posteriormente enviadas para os clientes, ou antes de serem destinadas aos clientes, passam pelo processo de transformação em bobinas no laminador de tiras a quente (LTQ).

Figura 6 – Fluxograma Produtivo ArcelorMittal Tubarão



Inaugurado em 2002, o Laminador de tiras a quente tem capacidade produtiva de 4 milhões de toneladas por ano e produz bobinas com espessura de 1,2mm até 19mm. O seu processo, representado abaixo pela figura 7, inicia com a movimentação das placas do pátio para as mesas de aproximação dos fornos, que por sua vez pesa as placas e as encaminham para aquecimento nos fornos. O forno de reaquecimento tem o objetivo de reaquecer a placa de maneira controlada até uma temperatura média de 1200 graus celsius para facilitar o processo de deformação plástica do material. Após o reaquecimento, a placa passará pela remoção dos óxidos superficiais através da pressão dos jatos de água da descarepação e posteriormente passará por reduções sucessivas na placa, tanto em sua espessura quanto em sua largura. Após o processamento no laminador desbastador o esboço é bobinado no coil box afim de homogenizar sua temperatura e diminuir sensivelmente a perda, melhorando a continuidade do processo de laminação no Trem acabador.

Figura 7 – Processo Laminador de Tiras a Quente



Fonte: Adaptado de arquivos internos da ArcelorMittal Tubarão, 2008.

Antes de entrar na laminação das cadeiras do trem acabador a tira passa pela tesoura de pontas, objeto de estudo deste trabalho, onde ocorre o corte automático das suas extremidades, além de uma segunda descarepação. No Trem acabador, que possui 6 cadeiras de laminação, a espessura mínima é alcançada e segue para o bobinamento nas bobinadeiras, passando antes pela mesa de resfriamento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresentará todo referencial teórico que fundamenta a análise do intervalo ótimo de manutenção realizada neste trabalho. Serão apresentadas as teorias RAM (confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade), análise de dados de vida, diagramas de confiabilidade, simulação de monte carlo e tempo ótimo de manutenção.

3.1 TEORIAS DA CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE (RAM)

O estudo de incertezas e fenômenos aleatórios cresce juntamente com a necessidade de otimização do desempenho dos sistemas. Na engenharia de confiabilidade esse estudo se destina a ocorrências de falhas, por exemplo. Tais fenômenos apresentam certa regularidade estatística que procede a partir do agrupamento e processamento de dados probabilísticos. (LUCCHESI, 2000)

As teorias RAM (reliability, availability and maintainability) são baseadas nesse processamento de dados probabilísticos, utilizando-se variáveis aleatórias discretas e contínuas (Departamento de Defesa dos EUA, 1998). As variáveis aleatórias discretas apresentam apenas um valor dentro de um conjunto discreto de valores enquanto as contínuas apresentam um número infinito de valores. (LUCCHESI, 2000)

Um exemplo de variável aleatória discreta é o número de falhas de um equipamento em um determinado período de tempo. Um exemplo de variável aleatória contínua é o tempo para que determinado equipamento falhe (Departamento de Defesa dos EUA, 1998). Para o objeto de estudo deste trabalho focaremos nas teorias RAM e distribuições estatísticas de variáveis contínuas.

3.1.1 TEORIA DA CONFIABILIDADE

A função distribuição acumulada $F(t)$ é definida como a probabilidade de que em um ensaio aleatório uma variável aleatória não seja maior que 't',

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (I)$$

Onde, $f(t)$ é a função densidade de probabilidade da variável aleatória, tempo para a falha. $F(t)$ pode ser considerado como a probabilidade de falha em um determinado tempo 't'. Se a variável aleatória for discreta, a integral é substituída por um somatório. A função confiabilidade, $R(t)$, ou a probabilidade de um equipamento não falhar em um determinado tempo 't', é expresso por:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (\text{II})$$

Derivando a equação acima, temos:

$$\frac{-dR(t)}{dt} = f(t) \quad (\text{III})$$

A probabilidade de falha em um intervalo de tempo t_1 e t_2 pode ser expressa pela função confiabilidade:

$$\int_{t_1}^{\infty} f(t) dt - \int_{t_2}^{\infty} f(t) dt = R(t_1) - R(t_2) \quad (\text{IV})$$

A taxa de falhas que ocorrem no intervalo de t_1 até t_2 , $\lambda(t)$ é definida como:

$$\lambda(t) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1) * R(t_1)} \quad \text{ou} \quad \lambda(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t * R(t)} \quad (\text{V})$$

A taxa de falha instantânea, também conhecida como 'Hazard Rate', é definida como o limite de Δt tendendo a 0:

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t * R(t)} \\ &= \frac{-1}{R(t)} * \frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} * \frac{-dR(t)}{dt} \\ h(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{VI}) \end{aligned}$$

Esta é uma das relações fundamentais das análises de confiabilidade, pois conhecendo a função densidade de falha $f(t)$ e a função confiabilidade $R(t)$, a Hazard Rate para qualquer tempo t pode ser encontrada. Esta relação dependerá da distribuição estatística considerada para $f(t)$ e $R(t)$. (Departamento de Defesa dos EUA, 1998)

Além dos conceitos de $f(t)$, $h(t)$, $\lambda(t)$ e $R(t)$ também temos outros conceitos básicos comumente utilizados como: MTTF (tempo médio para falha) e MTBF (tempo médio entre falhas).

$$\begin{aligned} MTTF &= \int_0^{\infty} t * f(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} t * \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] dt \end{aligned}$$

Integrando por partes e aplicando regra de L'Hopital,

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{VII})$$

O MTBF é um conceito que aparece frequentemente nas literaturas sobre confiabilidade, é aplicável para itens reparáveis. (Válido somente para taxas de falhas constante)

$$MTBF = \frac{T(t)}{r} \quad (\text{VIII})$$

Onde: $T(t)$ = tempo total de operação do equipamento e r = número de falhas nesse período.

Figura 8 – Resumo dos conceitos básicos de confiabilidade

Failure Density Function (time to failure)	$f(t)$
Reliability Function	$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \exp \left[-\int_0^t h(t) dt \right]$
Hazard Rate (Failure Rate)	$h(t) = f(t)/R(t)$ $\lambda(t) = \int_0^t h(t) dt$
Mean Time to Failure (MTTF) (no repair)	$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt$
Mean Time Between Failure (constant failure rate, λ , with repair)	$MTBF = \frac{T(t)}{r} = 1/\lambda$

Fonte: Electronic Reliability Design Handbook - Military Handbook – Department of defense – United States of America – 1998

3.1.2 MODELOS DE DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS CONTÍNUAS UTILIZADAS EM ANÁLISES DE CONFIABILIDADE

Para análises de confiabilidade, é necessário determinar distribuições de probabilidades que se adequem aos dados de sobrevivência dos equipamentos para uma dada idade.

Existem muitas distribuições estatísticas utilizadas para modelar os vários parâmetros de confiabilidade. Alguns modelos já conhecidos satisfazem em grande maioria os casos das análises de confiabilidade, e ficam a critério de escolha do utilizador para modelar os exemplos estudados.

- Distribuição Exponencial

Uma das distribuições mais utilizadas nas análises de confiabilidade e quase sempre utilizada exclusivamente para predição do comportamento de falha de componentes eletrônicos. Descreve a situação em que a Hazard Rate ($h(t)$) é constante. Se devidamente utilizada, apresenta vantagens como: fácil estimativa da taxa de falhas (λ) e tratamento matemático simples. (Departamento de Defesa dos EUA, 1998)

Algumas aplicações particulares deste modelo são:

- a) Itens cujas taxas de falhas não apresentam mudanças significativas com o tempo;
- b) Equipamentos complexos e reparáveis, sem muitas redundâncias;
- c) Equipamentos cujas falhas ou mortalidade infantil foi eliminada pela queima do equipamento em um período razoável.

A função densidade de probabilidade de falha, para $t > 0$, é:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{IX})$$

E sua função confiabilidade é:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{X})$$

- Distribuição Gama

A distribuição gama é utilizada nas análises de confiabilidade para os casos em que falhas parciais podem existir, ou seja, quando ocorrem um determinado número de falhas parciais antes do item vir a falhar. (Departamento de Defesa dos EUA, 1998)

A função densidade de probabilidade de falha, para $t > 0$, $\lambda > 0$, $\alpha > 0$, é:

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} * (\lambda t)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t} \quad (\text{XI})$$

Onde: λ (taxa de falha) = $\frac{\mu}{\sigma^2}$

α (número de falhas para a falha completa) = $\lambda \mu$

μ = média

σ = desvio padrão

$\Gamma(\alpha)$ é a função gama: $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$, que pode ser definido também na figura 9.

Figura 9 – Valores para $\Gamma(\alpha)$

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} X^{n-1} dx$$

n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$
1.00	1.00000	1.25	.90640	1.50	.88623	1.75	.9196
1.01	.99433	1.26	.90440	1.51	.88659	1.76	.92137
1.02	.98884	1.27	.90250	1.52	.88704	1.77	.92376
1.03	.98355	1.28	.99072	1.53	.88757	1.78	.92623
1.04	.97844	1.29	.89904	1.54	.88818	1.79	.92877
1.05	.97350	1.30	.89747	1.55	.88887	1.80	.93138
1.06	.96874	1.31	.89600	1.56	.88964	1.81	.93408
1.07	.96415	1.32	.89464	1.57	.89049	1.82	.93685
1.08	.95973	1.33	.89338	1.58	.89142	1.83	.93969
1.09	.95546	1.34	.89222	1.59	.89243	1.84	.94261
1.10	.95135	1.35	1.89115	1.60	.89352	1.85	.94561
1.11	.94739	1.36	.89018	1.61	.89468	1.86	.94869
1.12	.94359	1.37	.88931	1.62	.89592	1.87	.95184
1.13	.93993	1.38	.88854	1.63	.89724	1.88	.95507
1.14	.93642	1.39	.88785	1.64	.89864	1.89	.95838
1.15	.93304	1.40	.88726	1.65	.90012	1.90	.96177
1.16	.92980	1.41	.88676	1.66	.90167	1.91	.96523
1.17	.92670	1.42	.88636	1.67	.90330	1.92	.96878
1.18	.92373	1.43	.88604	1.68	.90500	1.93	.97240
1.19	.92088	1.44	.88580	1.69	.90678	1.94	.97610
1.20	.91817	1.45	.88565	1.70	.90864	1.95	.97988
1.21	.91558	1.46	.88560	1.71	.91057	1.96	.98374
1.22	.91311	1.47	.88563	1.72	.91258	1.97	.98768
1.23	.91075	1.48	.88575	1.73	.91466	1.98	.99171
1.24	.90852	1.49	.88595	1.74	.91683	1.99	.99527
						2.00	1.00000

Note: $\Gamma(n+x) = (n - 1+x)(n - 2+x) \dots (1 + x) \Gamma(1 + x)$
 e.g., $\Gamma(3.15) = (2.15)(1.15) \Gamma(1.15)$

Fonte: Eletronic Reliability Design Handbook -Military Handbook – Department of defense – United States of America – 1998

Quando $(\alpha-1)$ é um número positivo inteiro, o que ocorre para a maioria das análises de confiabilidade, temos:

$$f(t) = \frac{\lambda}{(\alpha - 1)!} * (\lambda t)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t}$$

Quando $\alpha=1$:

$$F(t) = \int_0^t \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} * (t)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t} dt$$

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^{\infty} (t)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t} dt \quad (XII)$$

E Hazard Rate, é dada por:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{(t)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t}}{\int_t^{\infty} (t)^{\alpha-1} * e^{-\lambda t} dt} \quad (\text{XIII})$$

- Distribuição Normal ou Gaussiana

Existem duas principais aplicações para as distribuições normais na confiabilidade. A primeira trata da análise de itens que apresentam falhas devido ao desgaste, tais como dispositivos mecânicos. A segunda é na análise de itens manufaturados e sua capacidade de atender suas especificações. (Departamento de Defesa dos EUA, 1998)

A função densidade de probabilidade de falha da distribuição normal é:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \text{ para } -\infty < t < \infty \quad (\text{XIV})$$

Onde: μ e σ são a média e o desvio padrão respectivamente.

A sua função confiabilidade e a Hazard Rate são dadas por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt \quad (\text{XV})$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt} \quad (\text{XVI})$$

- Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal é a distribuição cuja variável aleatória logaritmo natural tem uma distribuição normal, ou seja, é uma distribuição normal com $\ln(t)$ como variável.

A função densidade de probabilidade é dada, para $t > 0$, por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} * \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (\text{XVII})$$

Onde: Média = $\exp \left(\mu + \frac{\sigma^2}{2} \right)$ e o desvio padrão = $[\exp(2\mu + 2\sigma^2) - \exp(2\mu + \sigma^2)]^{\frac{1}{2}}$

μ e σ são média e desvio padrão de $\ln(t)$ respectivamente.

A distribuição lognormal é comumente utilizada nas análises de semicondutores e de fadiga de componentes mecânicos. A função distribuição acumulada é dada por:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} * \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt \quad (\text{XVIII})$$

Assim, as funções confiabilidade e Hazard Rate são dadas por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} * \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt \quad (\text{XIX})$$

$$h(t) = \frac{\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} * \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} * \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt} \quad (\text{XX})$$

- Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma das mais utilizadas nos estudos de confiabilidade por se ajustar bem a uma grande variedade de distribuições de vida de diversos equipamentos.

Uma de suas versões tem a função densidade de probabilidade de falha dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (\text{XXI})$$

Onde: β = parâmetro de forma (ou inclinação);

η = parâmetro de escala (também chamado de vida característica);

γ = parâmetro de localização (também chamado de vida mínima).

É muito usual, para análises de confiabilidade, γ ser considerado 0, sendo assim a função densidade de probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (\text{XXII})$$

A função confiabilidade e Hazard Rate, são dadas por:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (\text{XXIII})$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{XXIV})$$

Dependendo do valor de β , a distribuição de Weibull pode se ajustar para as outras distribuições:

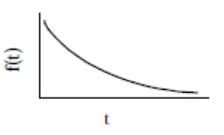
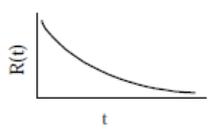
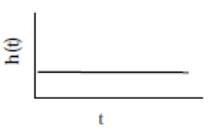
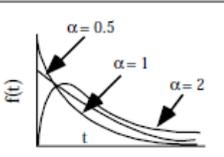
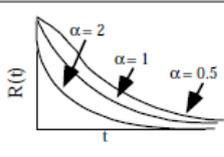
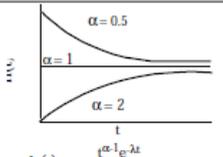
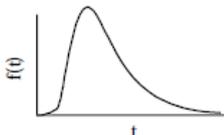
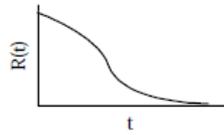
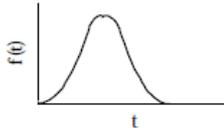
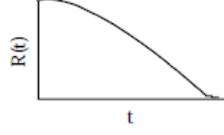
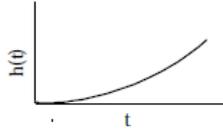
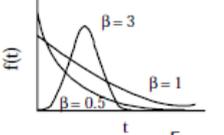
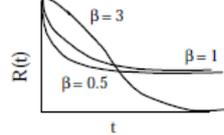
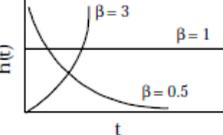
$\beta < 1$ - Gama

$\beta = 1$ - Exponencial

$\beta = 2$ - Lognormal

$\beta = 3,44$ - Normal (aproximada)

Figura 10 – Resumo das distribuições contínuas comumente utilizadas e suas funções

TYPE OF DISTRIBUTION	PROBABILITY DENSITY FUNCTION, $f(t)$	RELIABILITY FUNCTION $R(t) = 1 - F(t)$	HAZARD FUNCTION $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$
EXPONENTIAL	 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	 $R(t) = e^{-\lambda t}$	 $h(t) = \lambda = \theta^{-1}$
GAMMA	 $f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} (\lambda t)^{\alpha-1} e^{-\lambda t}$	 $R(t) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt$	 $h(t) = \frac{\lambda^\alpha e^{-\lambda t}}{\int_t^\infty t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt}$
LOGNORMAL	 $f(t) = \frac{1}{\sigma t (2\pi)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}$	 $R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$ See Note	 $h(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)}$
NORMAL	 $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2}$	 $R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)$ See Note	 $h(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)}$
WEIBULL	 $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left[\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right]}$	 $R(t) = e^{-\left[\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right]}$	 $h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$

Note: $\Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$ (lognormal) and $\Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)$ (normal) is the standardized form of these distributions and is equal to the integral of the pdfs for those distributions (i.e., the cumulative distribution function).

Fonte: Eletronic Reliability Design Handbook -Military Handbook – Department of defense – United States of America – 1998

3.1.3 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

Determinar a confiabilidade de um sistema ou linhas de produção como, por exemplo, as linhas de acabamento de bobinas, objeto de estudo deste trabalho, pode ser uma tarefa muito onerosa, cara e às vezes impraticável. Por conta disso, muitas das vezes recomenda-se realizar as análises de confiabilidade em subsistemas e componentes, e com o auxílio das teorias de confiabilidade de sistemas, pode-se a

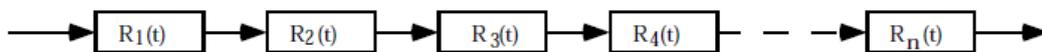
partir das análises de vida dos componentes extrair as informações do sistema de acordo com sua configuração. (Departamento de Defesa dos EUA, 1998)

As configurações de sistemas são representadas por diagramas de blocos de confiabilidade, conhecidos como RDBs (Reliability Block Diagrams).

- Configuração em Série

A mais simples e talvez mais comum configuração em modelagem matemática de confiabilidade. O sucesso da operação do sistema depende de todos os componentes. Uma configuração de confiabilidade em série é representada na figura 11. Além disso, assume-se que as falhas de cada componente são independentes das falhas dos demais. Caso não, as probabilidades condicionais devem ser utilizadas, tornando o cálculo mais complexo.

Figura 11 – Configuração de confiabilidade em série



Fonte: Electronic Reliability Design Handbook -Military Handbook – Department of defense – United States of America – 1998

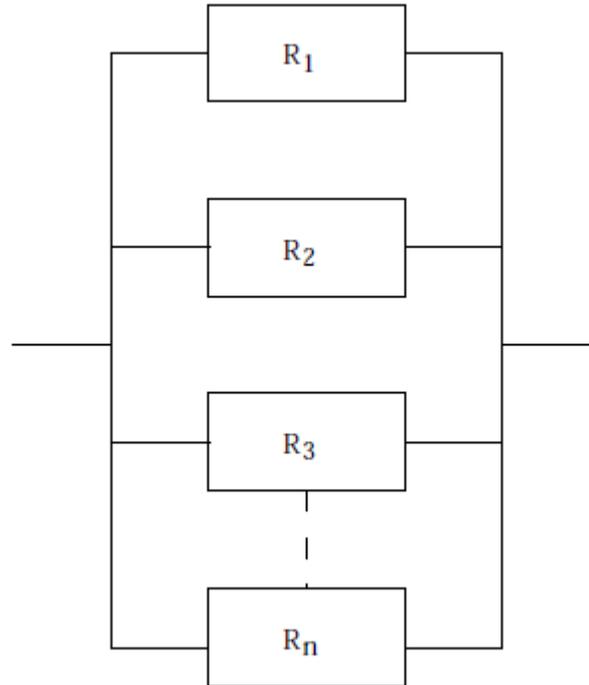
A Confiabilidade do Sistema é dada por:

$$R_s(t) = R_1(t) * R_2(t) * ... * R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (XXV)$$

- Configuração em Paralelo

Outra configuração bastante usual nos modelos matemáticos de confiabilidade é a configuração de sistemas em paralelo, representada na figura 12, cuja falha do sistema dependerá da falha de todos os componentes ao mesmo tempo.

Figura 12 – Configuração de confiabilidade em paralelo



Fonte: Eletronic Reliability Design Handbook -Military Handbook – Department of defense – United States of America – 1998

Considerando $Q_i = 1 - R_i$, a probabilidade de falha de determinado componente do sistema, a probabilidade de falha do sistema (Q_s) será:

$$Q_s(t) = Q_1(t) * Q_2(t) * \dots * Q_n(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t)$$

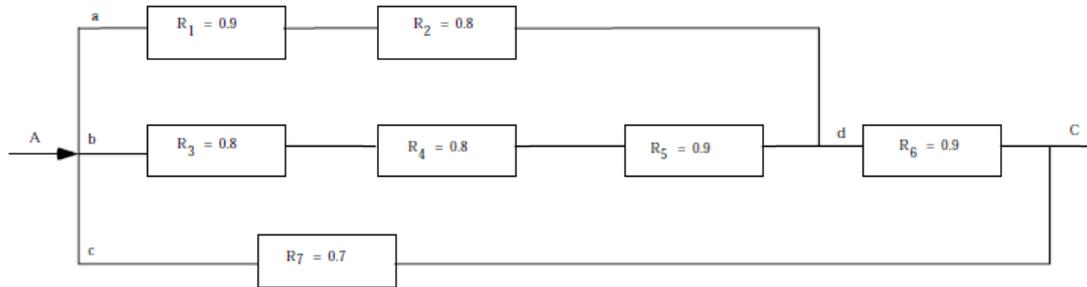
E a confiabilidade do sistema será dada por:

$$R_s(t) = 1 - Q_s(t) = 1 - [(1 - R_1(t)) * \dots * (1 - R_n(t))] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

(XXVI)

Os arranjos mais comuns encontrados são sistemas combinados em série e paralelos conforme mostrado na figura 13.

Figura 13 – RDB combinado paralelo e série



Fonte: Electronic Reliability Design Handbook -Military Handbook – Department of defense – United States of America – 1998

- Configuração k de n

Um sistema composto de n equipamentos e que necessita apenas de que k estejam funcionando e denominado sistema k de n. Sistemas assim são muito comuns na indústria aeronáutica por conta da grande necessidade de redundância.

Considerando um sistema de equipamentos idênticos, a confiabilidade do sistema é dada por:

$$R_s(k, n, R(t)) = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} R(t)^r (1 - R(t))^{n-r} \quad (\text{XXVII})$$

Caso a confiabilidade dos equipamentos não seja a mesma, todas as combinações operacionais possíveis devem ser levadas em consideração. Por exemplo, um sistema de 3 equipamentos em paralelos, com confiabilidades $R_1(t)$, $R_2(t)$ e $R_3(t)$, que permite que um deles entre em falha e mesmo assim o sistema funcione, deve-se levantar todas as possibilidades possíveis de sucesso.

- 1- Todos equipamentos funcionam;
- 2- Equipamento 1 em falha e os demais funcionando;
- 3- Equipamento 2 em falha e os demais funcionando;
- 4- Equipamento 3 em falha e os demais funcionando.

Assim, a confiabilidade desse sistema será a soma de todas essas possibilidades:

$$R_s(t) = [R_1(t) * R_2(t) * R_3(t)] + [(1 - R_1(t)) * R_2(t) * R_3(t)] + [R_1(t) * (1 - R_2(t)) * R_3(t)] + [R_1(t) * R_2(t) * (1 - R_3(t))] \quad (\text{XXVIII})$$

3.1.4 TEORIA DA MANTENABILIDADE

Em confiabilidade, um ativo excelente seria aquele que consegue permanecer um determinado período de tempo sem apresentar falhas, ou seja, $R(t) = 1$. Já se falando em manutenibilidade, o objetivo é reparar o equipamento o mais rápido possível. Combinando-se alta confiabilidade com alta manutenibilidade o resultado é um ativo com alta disponibilidade. (Departamento de Defesa dos EUA, 1998)

Mantenabilidade, portanto, é uma medida de facilidade e rapidez em que se consegue reparar um equipamento ao seu estado original após sua falha. De maneira análoga a teoria da confiabilidade, a manutenibilidade também é estudada a partir de parâmetros probabilísticos, variáveis aleatórias contínuas e discretas, e distribuições estatísticas. Um exemplo de variável aleatória discreta de manutenibilidade é o número de intervenções em um equipamento enquanto uma variável aleatória contínua seria o tempo para completar o reparo desse equipamento.

Uma boa maneira de se estudar a manutenibilidade é comparando-a com a confiabilidade. As funções são concebidas de maneira idêntica, basta substituímos os termos 't' (tempo para falha), λ (taxa de falha) e $F(t)$ (probabilidade de falha) por 't' (tempo para reparo), μ (taxa de reparo) e $M(t)$ (probabilidade de reparo) respectivamente. A figura 14 representa essa comparação.

Figura 14 – Comparação das funções básicas de confiabilidade e manutenibilidade

RELIABILITY	MAINTAINABILITY
<u>Time to Failure (pdf)</u> $f(t)$	<u>Time to Repair (pdf)</u> $g(t)$
<u>Reliability</u> $R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$	<u>Maintainability</u> $M(t) = \int_0^t g(t) dt$
<u>Failure Rate</u> $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	<u>Repair Rate</u> $\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$
<u>Mean-Time-to-Failure</u> $MTTF = \int_{-\infty}^{\infty} tf(t) dt$ $= \int_0^{\infty} R(t) dt$	<u>Mean Time to Repair</u> $MTTR = \int_{-\infty}^{\infty} tg(t) dt$

Os modelos de distribuições estatísticas utilizados nas análises de manutenibilidade também são análogos. As distribuições usualmente mais utilizadas são a normal, lognormal e exponencial.

3.1.5 TEORIA DA DISPONIBILIDADE

O conceito de disponibilidade foi desenvolvido para componentes e sistemas reparáveis. É definido como a probabilidade de que um sistema esteja disponível, ou seja, que permita operação satisfatória em um determinado tempo (t). Em outras palavras disponibilidade é a combinação de parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade. (Departamento de Defesa dos EUA, 1998)

Classificações de disponibilidade:

- Disponibilidade Instantânea ou Pontual – A(t):

Probabilidade de que um sistema esteja disponível para operação para um determinado tempo (t).

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u) * m(u) du \quad (XXIX)$$

- Disponibilidade média – Am(t2-t1):

É a proporção de tempo em um intervalo de t1 a t2 em que o sistema está disponível, dado por:

$$Am(t2 - t1) = \frac{1}{t2-t1} \int_{t1}^{t2} A(t) dt \quad (XXX)$$

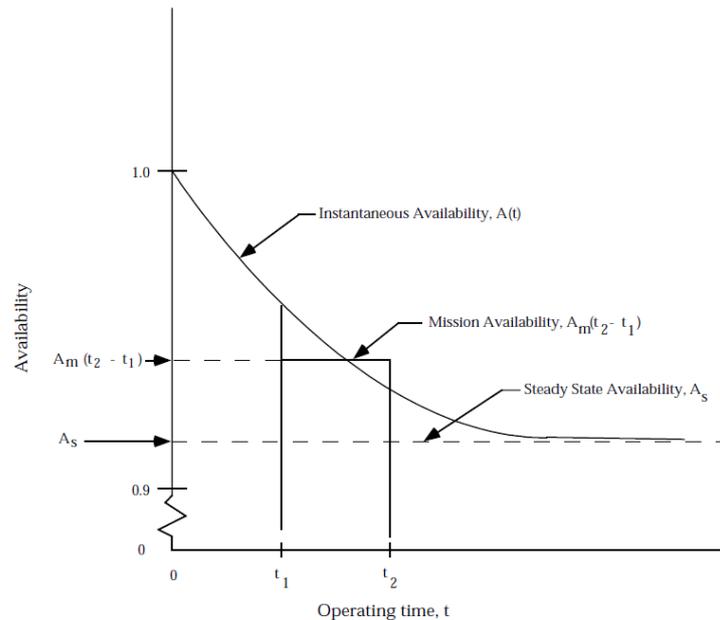
- Disponibilidade de um regime permanente – As:

É a disponibilidade do sistema em um tempo t tendendo infinito, dado por:

$$As = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (XXXI)$$

A figura 15 ilustra essas disponibilidades.

Figura 15 – Relação entre disponibilidade instantânea, média e em regime permanente



Fonte: Electronic Reliability Design Handbook -Military Handbook – Department of defense – United States of America – 1998

- Disponibilidade operacional – A_o:

A disponibilidade operacional é a disponibilidade que leva em consideração todas as paradas (corretivas, planejadas, logísticas, administrativas), é a verdadeira disponibilidade sentida pelo cliente. Dada por:

$$A_o = \frac{\text{tempo disponível}}{\text{tempo total de operação}} \quad (\text{XXXII})$$

- Disponibilidade intrínseca ou Inerente – A_i:

A disponibilidade inerente não leva em consideração paradas administrativas, de logística e paradas de manutenção preventiva, ou seja, considera somente paradas de manutenção corretiva.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{XXXIII})$$

3.2 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)

A análise de dados de vida utiliza de teorias estatísticas para construir modelos probabilísticos, a partir de dados de falhas (ReliaSoft, 2012).

Segundo Rousand e Heyland, 2004, para se obter informações referentes a uma curva $F(t)$ de um determinado equipamento, muitas vezes são realizados testes de vida nos quais n desses equipamentos falham e tem seus dados de vidas registrados. Estes dados são chamados de dados completos.

Muitas vezes temos de estar satisfeitos com dados incompletos, pois por diversas vezes pode ser impraticável ou muito caro esperar que todos os itens tenham falhado, ou porque durante a vida do ativo atuamos diversas vezes de maneira que interferimos em sua vida. Esses tipos de dados são ditos como dados censurados.

Ao considerar dados de itens reparáveis, devemos primeiro verificar se temos um processo de renovação de vidas independente e distribuído de forma idêntica. Vários métodos gráficos e testes foram desenvolvidos para verificar esta afirmação. Na prática a suposição de vidas distribuídas de forma idêntica corresponde a suposição de que os itens não são afetados por outra operação ou falha de qualquer outro item (Rousand, 2004). Premissa importantíssima para o desenvolvimento deste trabalho.

A censura de dados pode se dar a esquerda, a direita e por intervalos. A censura de dados a direita, também conhecida como suspensão, indica que a observação de uma vida foi terminada antes que aquele item falhe, ou seja, sabe-se quando um item foi colocado em operação, mas não quando ele falha. Dados censurados a esquerda são aqueles em que não se sabe quando o item foi colocado em operação, ou seja, sabe-se que quando a observação começou o item estava funcionando, mas não se sabe a quanto tempo. Já as censuras por intervalos são aquelas nas quais no momento de observação (por exemplo uma inspeção) se identifica que o item falhou, mas não se sabe ao certo quando isso ocorreu (ReliaSoft, 2012).

3.3 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A simulação de Monte Carlo é conhecida como qualquer método de uma classe de métodos estatísticos que se baseiam em amostragens aleatórias massivas para

obter resultados numéricos, isto é, através de sucessivas simulações calcula-se probabilidades para solucionar problemas.

Segundo Benbow e Broome, 2009, na simulação Monte Carlo, cálculos repetidos do desempenho do sistema são feitos usando valores selecionados aleatoriamente com base nas distribuições de probabilidade que descrevem cada elemento do modelo. O grande número de valores de desempenho do sistema gerado pode ser usado para desenvolver uma distribuição de probabilidade do desempenho do sistema. A simulação Monte Carlo não envolve matemática complexa. Entretanto, requer um uso extensivo do tempo do computador como cada evento possível do modelo deve ser repetidamente amostrado sobre o tempo de missão desejado.

Para este trabalho as simulações de Monte Carlo serão realizadas através do módulo BlockSim do software Synthesis da ReliaSoft.

3.4 CÁLCULO DOS TEMPOS ÓTIMOS

Para otimizar o desempenho de um equipamento é essencial que as manutenções preventivas estejam com os seus tempos otimizados. Tal otimização deve obdecer alguns critérios e conceitos matemáticos:

- Componente avaliado deve possuir uma taxa de falha crescente
- Custo da ação corretiva deve ser menor que a ação preventiva

Em função dos riscos associados as curvas de confiabilidade, é possível otimizar a relação entre os custos de manutenção preventiva e corretiva, por consequência identificar assim um tempo ótimo associado ao melhor custo.

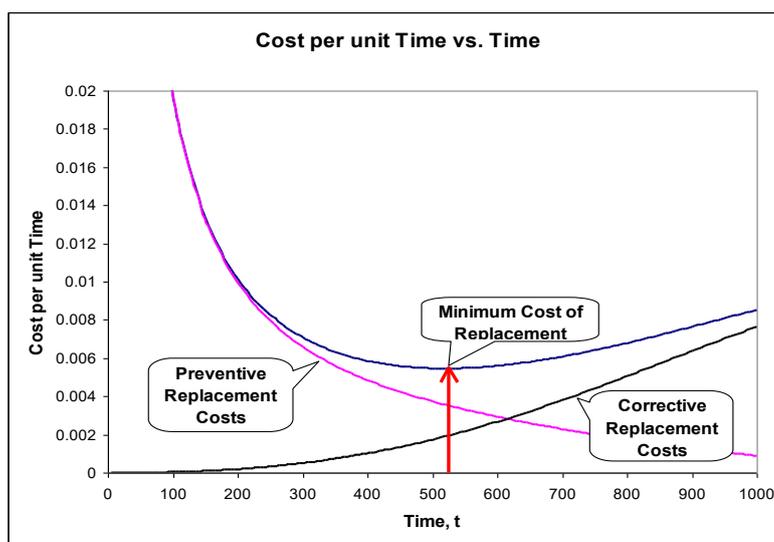
$$\begin{aligned}
 CPUT(t) &= \frac{\textit{Total Expected Replacement cost per Cycle}}{\textit{Expected cycle length}} \\
 &= \frac{C_p * R(t) + C_u * (1 - R(t))}{\int_0^t R(s) ds} \quad (\text{XXXIV})
 \end{aligned}$$

Onde:

- $R(t)$ = Confiabilidade a um dado tempo t .
- CP = Custo de trocas planejadas.
- CU = Custo de trocas não planejadas.

Derivando a função em 0, é possível encontrar o ponto ótimo.

Figura 16 – Tempo Ótimo



Fonte: Adaptado Reliasoft, 2019.

4 DESENVOLVIMENTO

Para alcançar os intervalos ótimos de manutenção da Tesoura de pontas foi realizado primeiramente uma análise RAM de toda a linha do Laminador de Tiras a quente considerando os registros de falha (tempo até falha) e de reparo (tempo até reparo) dos seus equipamentos.

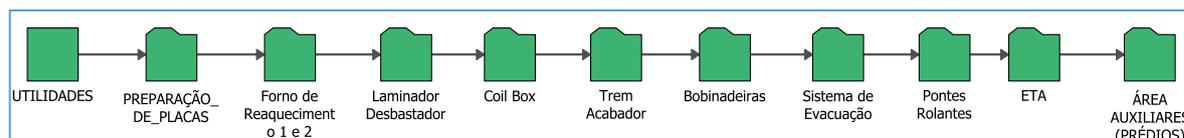
Com esta primeira análise pode-se identificar os equipamentos mais críticos da linha, pensando em sua disponibilidade. Assim foi selecionado a Tesoura de Pontas para uma análise mais profunda. Foram identificados todos os itens manuteníveis da tesoura e por meio de entrevistas de confiabilidade com especialistas de manutenção pode-se atribuir curvas de confiabilidade e manutenibilidade para cada LRU.

De posse das curvas de confiabilidade e manutenibilidade de cada LRU da tesoura de pontas e com a definição dos custos preventivos e corretivos, pode-se modelar o tempo ótimo das manutenções preventivas, por meio da ferramenta “Reposição ótima” do software BlockSim da reliasoft.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DA TESOURA DE PONTOS COMO OBJETO DE ESTUDO

Para definir a tesoura de pontas como objeto de estudo deste trabalho, foi realizado uma análise RAM por meio do software Blocksim da Reliasoft, levando em consideração o histórico de registros de tempo até falha e tempo até reparo. Com esse histórico e utilizando a metodologia de LDA, foi construindo o diagrama de blocos de confiabilidade do Laminador, conforme figura 17 abaixo. Para a simulação foi considerado um tempo de operação correspondente a 8760 horas.

Figura 17 – Diagrama de Blocos do Laminador de Tiras a Quente



Fonte: BlockSim, 2019.

Como resultado da análise RAM do Laminador foram obtidos os resultados apresentados abaixo na figura 18. O indicador RS FCI corresponde ao índice de criticidade de falha do equipamento, ou seja, um percentual entre o número de

falhas do equipamento sobre o total de falhas do sistema, já o indicador RS DTCI corresponde ao índice de criticidade do tempo indisponível do equipamento, ou seja, o tempo indisponível do equipamento sobre o tempo indisponível do sistema.

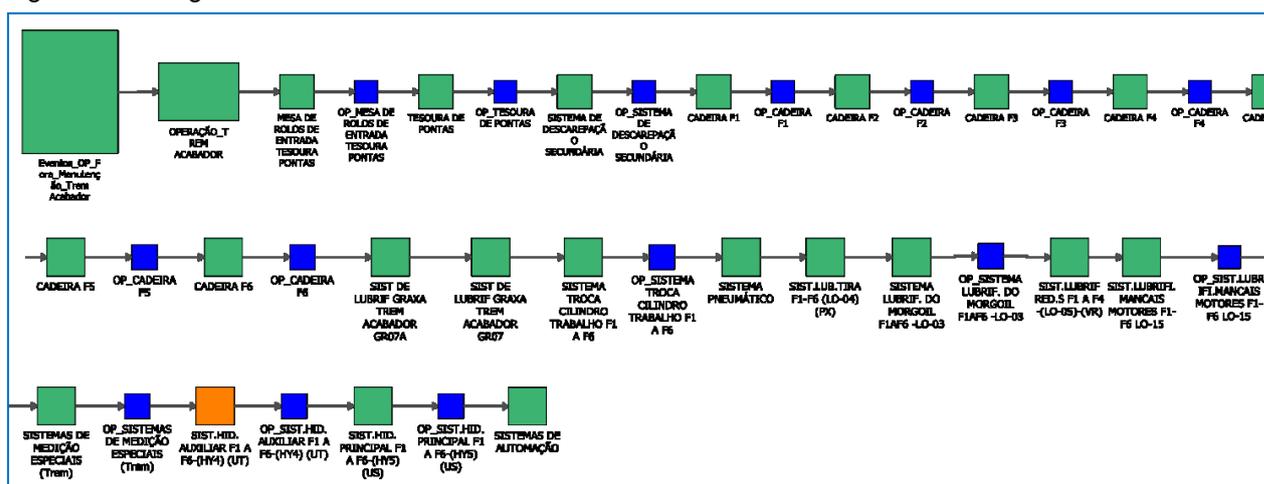
Figura 18 – Indicadores da análise RAM do Laminador

LTQ - Sistemas					
Nome do Bloco	RS FCI	RS DTCI	Disponibilidade	# Esperado Falhas	Tempo Indisponível do Bloco (h)
Equipamento F	48,08%	44,46%	86,57%	6437,98	1176,70
Trem Acabador	20,76%	22,25%	92,93%	2984,11	619,27
Equipamento A	8,14%	6,88%	97,76%	1232,65	195,86
Equipamento C	8,06%	7,59%	97,54%	1218,48	215,17
Equipamento I	7,21%	7,18%	97,67%	1090,64	204,03
Equipamento B	3,32%	7,28%	97,88%	423,98	185,65
Equipamento E	2,73%	2,19%	99,31%	419,39	60,28
Equipamento H	1,18%	0,92%	99,69%	181,56	26,82
Equipamento D	0,35%	0,90%	99,72%	53,10	24,23
Equipamento J	0,18%	0,35%	99,89%	27,50	9,61
Equipamento G	0,00%	0,00%	100,00%	0,00	0,00

Fonte: BlockSim, 2019.

A partir desta primeira análise RAM foi identificado a necessidade de descer mais um nível no diagrama de blocos do Laminador, e cada setor da linha foi estratificado em mais equipamentos conforme a figura 19 abaixo que demonstra o diagrama de blocos do Trem Acabador.

Figura 19 – Diagrama de blocos do Trem Acabador



Fonte: BlockSim, 2019.

Uma análise RAM foi novamente realizada e os resultados obtidos para 16 equipamentos que foram elencados pelos especialistas de manutenção como os mais

críticos estão apresentados na figura 20. Para a segunda análise foi acrescentado mais um indicador para auxiliar a tomada de decisão, o impacto na produção, pois um equipamento poderia apresentar uma indisponibilidade baixa, porém o seu impacto no processo produtivo ser elevado.

Figura 20 – Indicadores da análise RAM dos 16 equipamentos mais críticos do Laminador

Setor	Nome do Bloco	RS FCI	RS DTCl	Impacto na Produção	Disponibilidade Média	Qtd Esperado Falhas	Tempo Indisponível do Bloco (h)
Setor F	Equipamento 4	2,48%	5,32%	0,77%	99,23%	183,10	67,10
	Equipamento 5	0,70%	0,99%	0,15%	99,85%	52,68	12,92
	Equipamento 1	0,34%	0,65%	0,10%	99,90%	25,02	8,35
	Equipamento 3	0,31%	1,84%	0,26%	99,74%	22,90	22,37
	Equipamento 2	0,30%	0,57%	0,08%	99,92%	22,38	7,29
Trem Acabador	Equipamento 7	1,08%	3,29%	0,24%	99,76%	34,49	20,97
	Equipamento 6	0,85%	3,58%	0,26%	99,74%	27,28	22,75
	Tesoura de Pontas	0,72%	5,10%	0,37%	99,63%	23,22	32,14
Setor A	Equipamento 8	4,18%	12,33%	0,28%	99,72%	52,65	24,27
	Equipamento 9	0,76%	9,63%	0,22%	99,78%	9,57	18,86
Setor C	Equipamento 11	7,40%	15,64%	0,38%	99,62%	91,64	33,66
	Equipamento 12	5,55%	11,35%	0,28%	99,72%	69,03	24,48
	Equipamento 10	4,17%	7,84%	0,19%	99,81%	51,94	16,94
Setor B	Equipamento 15	11,34%	22,11%	0,56%	99,44%	57,66	48,71
	Equipamento 13	0,29%	0,40%	0,84%	98,33%	120,74	146,35
	Equipamento 14	0,29%	0,34%	0,45%	99,08%	65,52	80,72

Fonte: BlockSim, 2019.

Dentre esses 16 equipamentos previamente levantados pelos especialistas foi selecionado como objeto deste trabalho a Tesoura de Pontas do Trem acabador.

4.2 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CONFIABILIDADE E MANTENABILIDADE DOS LRU'S DA TESOURA DE PONTAS

Após a definição da Tesoura de pontas como o equipamento a ser estudado o intervalo ótimo de manutenção, identificou-se todos os seus itens manuteníveis (LRU's) através do seu cadastro no sistema de gestão da manutenção.

Por conta do fraco histórico de falhas no nível dos itens manuteníveis, optou-se por levantar as curvas de confiabilidade e manutenibilidade destes itens por meio de entrevistas de confiabilidade com especialistas de manutenção da Tesoura de Pontas.

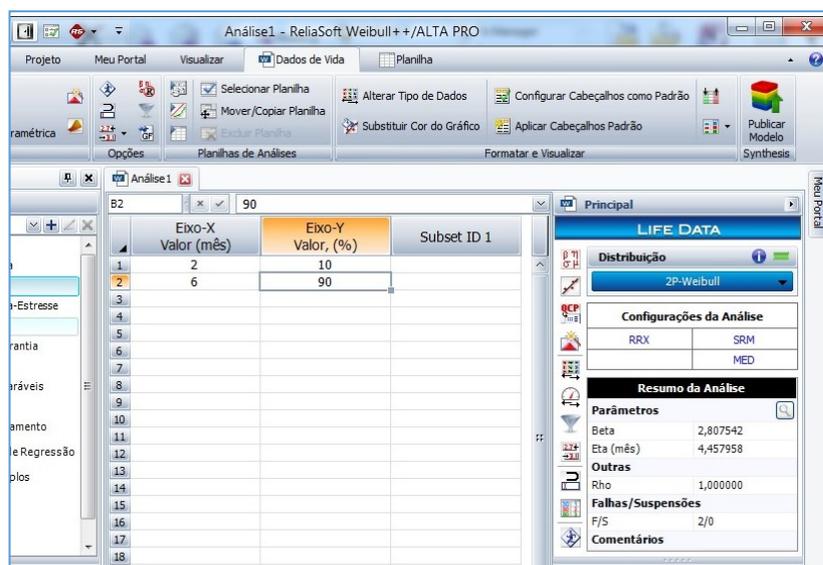
Nas entrevistas de confiabilidade quanto mais informações forem extraídas mais a modelagem estará próxima do comportamento da falha. No caso da entrevista realizada para este trabalho, foi orientado aos entrevistados para que os aspectos abaixo fossem levados em consideração.

- Componentes que podem causar paradas funcionais do equipamento analisado;
- Itens que nunca apresentaram falhas;
- Visão geral do componente, ou seja, análise considerando todos os modos de falha simultaneamente;
- Estimativa de vida independente dos efeitos das manutenções planejadas realizadas no item;
- Comportamento de reparo do equipamento na ocorrência da falha do componente analisado.

Exemplos de resultados obtidos com as entrevistas de confiabilidade:

- Cenário 1 – Entrevistado consegue descrever um percentual de falhas para mais de um período de vida do ativo (nos primeiros 2 meses de operação ocorrem 10% das falhas e nos próximos 4 meses ocorrem 90%). Neste caso a modelagem deste equipamento se dará conforme figura 21.

Figura 21 – Exemplo modelagem LDA entrevista de confiabilidade



Fonte: Weibull++, 2019.

- Cenário 2 – Entrevistado consegue descrever um número de falhas em um período de operação do equipamento. Nesses casos é possível definir apenas uma taxa de falha e considerar a modelagem de distribuição exponencial.

Após realizada a entrevista de confiabilidade para cada item manutenível da Tesoura de Pontas, as distribuições probabilísticas de confiabilidade e manutenibilidade destes elementos foram modeladas no Weibull++ da ReliaSoft e depois atribuídas em um novo diagrama de blocos de confiabilidade, agora no nível de itens manuteníveis, no BlockSim da Reliasoft.

4.3 CÁLCULO DO TEMPO ÓTIMO DE MANUTENÇÃO DA TESOURA DE PONTAS

De posse das curvas de manutenibilidade e confiabilidade de todos os LRU's da Tesoura de pontas, o último elemento necessário para a realização da simulação que projetará o intervalo ótimo de manutenção de cada LRU é a relação entre os custos das manutenções corretivas e preventivas.

Esta relação de custos foi obtida através dos cálculos abaixo.

- $\text{Custo Preventivo} = \text{Tempo de substituição}(h) * [\text{Tarifa Preventiva}(R\$/h) + \text{Lucro Cessante}(R\$/h)]$
- $\text{Custo Corretivo} = \text{Tempo de substituição}(h) * [\text{Tarifa Corretiva}(R\$/h) + \text{Lucro Cessante}(R\$/h)] * \text{Fator Corretivo}$

Onde,

- Tempo de substituição = Tempo de reparo do equipamento;
- Tarifa preventiva = custo de mão de obra estimado para atividade preventiva;
- Tarifa corretiva = custo de mão de obra estimado para atividade preventiva;

- Lucro Cessante = Custo estimado para o tempo em que se deixa de produzir;
- Fator Corretivo = fator aplicado em relação ao custo do serviço/material emergencial

Com a definição da relação de custos foi possível calcular o tempo ótimo de reposição de cada elemento da tesoura de pontas com a ferramenta de reposição ótima do BlockSim da ReliaSoft.

Figura 22 – Ferramenta de Simulação de Tempo ótimo da ReliaSoft.



Fonte: BlockSim, 2019.

Na tabela 1, resultado da simulação realizada, podemos verificar os tempos ótimos de substituição dos LRU's da Tesoura de pontas e bem como o tempo total de duração das suas atividades.

Tabela 1 – Tempos ótimos de substituição dos LRU's da Tesoura de Pontas.

Componente (LRU)	Duração da MP (hr)	Relação de Custo Preventivo x Corretivo	Tempo Ótimo (hr)	Tempo Ótimo (dias)
CICLO CONVERSOR MOTOR INDUÇÃO - MC1THY01	10,000	1,50074	--	--
MOTOR INDUÇÃO - MC1	12,000	1,50074	--	--
SENSOR DE VELOCIDADE RESOLVER	3,000	1,50074	123091	5128,8
REDUTOR	1,000	1,50074	12309	512,9
CILINDRO HIDRÁULICO DE ACOPLAGEM	4,000	1,50074	61545	2564,4
MOTOR HIDRÁULICO DE POSICIONAMENTO	2,000	1,50074	123091	5128,8
ENCODER ABS VRE - MC1SAT01	1,000	1,50074	66966	2790,3
SENSOR HMD PONTUAL - MA1EST11	1,000	1,50074	66966	2790,3
SENSOR HMD PONTUAL - MA1EST12	1,000	1,50074	66966	2790,3
SENSOR HMD PONTUAL - MC1EST11	1,000	1,50074	66966	2790,3
SENSOR HMD PONTUAL - MC1EST12	1,000	1,50074	66966	2790,3
TRANSDUTOR DE POSIÇÃO - MB1SDT02 - LO	1,000	1,50074	66966	2790,3
TRANSMISSOR DE POSIÇÃO - MB1SDT01 - LA	1,000	1,50074	66966	2790,3
BRAÇO LA	12,000	1,50074	47279	1970,0
BRAÇO LO	12,000	1,50074	47279	1970,0
GUARDA LATERAL LA	2,000	1,50074	19715	821,5
GUARDA LATERAL LO	2,000	1,50074	19715	821,5
AVENTAL DE SAIDA DA TESOURA	1,167	1,50074	19715	821,5
CHAPA DEFLETORA	0,667	1,50074	19715	821,5
TUBULAÇÃO DE GRAXA	1,500	1,50074	98577	4107,4
TUBUL. ÓLEO SIST.LUBRIF.ENGRENAGENS LA	1,500	1,50074	98577	4107,4
TUBUL. ÓLEO SIST.LUBRIF.ENGRENAGENS LO	1,500	1,50074	98577	4107,4
TUBULAÇÃO DE GRAXA	1,500	1,50074	98577	4107,4
CONJUNTO ÓPTICO	1,000	1,50074	61545	2564,4
LENTE EXTERNA	1,000	1,50074	61545	2564,4
SENSOR HMD SCAN - MC1EST13	1,000	1,50074	61545	2564,4
CANHÃO LASER DA TESOURA	1,000	1,50074	61545	2564,4
MOTOR DE VENTILAÇÃO DO MOTOR DA TESOURA	1,333	1,50074	94558	3939,9
CLINDRO HIDRÁULICO ACIONAMENTO DO CARRO	2,000	1,50074	19715	821,5
RAMPA DE APARAS	2,000	1,50074	12309	512,9

Fonte: BlockSim, 2019.

5 CONCLUSÕES

Analisando os resultados deste trabalho pode-se concluir que o seu objetivo principal foi alcançado por meio do resultado dos intervalos ótimos para cada LRU da Tesoura de pontas. O seu desenvolvimento fomenta a concepção de que os tempos ótimos de intervalos de manutenção são uma excelente ferramenta para auxiliar a tomada de decisão na gestão dos ativos, pois são baseados em estatísticas, engenharia quantitativa e na relação de custos das manutenções preventivas e corretivas. O trabalho realizado acrescenta grande valor no plano de manutenção atual da Tesoura de pontas, pois fundamenta a execução de atividades atuais bem como modificações necessárias, que irão trazer maior economia para os planos que terão sua frequência dilatada ou maior confiabilidade para o equipamento nos casos dos planos que deverão ser inseridos ou terem sua frequência encurtada.

Este trabalho também apresenta e valida a ferramenta de entrevistas de confiabilidade, muito boa para viabilizar estudos de engenharia de confiabilidade de ativos que não apresentam um histórico de falhas muito confiável. Este foi o principal desafio do trabalho, a qualidade dos registros estava baixa e o mesmos não estavam no nível adequado de LRU.

Outro resultado deste trabalho é a padronização de uma metodologia para definição de intervalos ótimos de troca dos ativos para a ArcelorMittal Tubarão, passando pela modelagem RAM dos processos produtivos no nível macro, seguindo pelas entrevistas de confiabilidade para os itens manuteníveis dos equipamentos e por último uma definição da relação custo manutenção preventiva versus corretiva.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a realização de trabalhos futuros semelhantes a estes para os demais equipamentos do Laminador de tiras a quente, com o intuito de realizar a modelagem RAM de todo o processo a nível de LRU, bem como obter seus intervalos ótimos de troca.

Recomenda-se também a realização de um estudo de otimização do intervalo de paradas do Laminador levando em conta a interação de todos estes tempos ótimos de trocas descritos no item anterior.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 55000:2014:** Gestão de ativos – Visão geral, princípios e terminologia.

ARCELORMITTAL. **Catálogo de produtos laminados.** Edição 2015.

ARCELORMITTAL. **Manuais de operação e manutenção da Tesoura de Pontas.**

BENBOW, D.; BROOME, H. **The Certified Reliability Engineer Handbook.** Milwaukee. 2009.

CAVALCA, Kátia Lucchesi. **Apostila Confiabilidade de sistemas,** Departamento de Projeto Mecânico – FEM – UNICAMP – 2000.

DEPARTMENT OF DEFENSE, United States of America. **Electronic Reliability Design Handbook.** 1998.

RELIASOFT. **Materiais de Treinamento.** 2012

ROUSAND, M ; HEYLAND, A. **System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications.** Second Edition. 2004