

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

**ELIEZER COTRIM THULER**

**ANÁLISE RAM APLICADA AO AUMENTO DE CONFIABILIDADE NA  
LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA DE AÇOS PLANOS**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2017**

**ELIEZER COTRIM THULER**

**ANÁLISE RAM APLICADA AO AUMENTO DE CONFIABILIDADE NA  
LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA DE AÇOS PLANOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

**CURITIBA**

**2017**



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



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE RAM APLICADA AO AUMENTO DE CONFIABILIDADE NA LINHA DE  
GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA DE AÇOS PLANOS

por

ELIEZER COTRIM THULER

Esta monografia foi apresentada em 03 de novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

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

---

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

---

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

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à minha esposa querida e às minhas filhas lindas, pelo apoio e compreensão nos momentos de dedicação aos estudos.

Dedico também aos meus pais que sempre me apoiaram e me ensinaram valores e princípios que me motivam a continuar aprimorando os meus conhecimentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, que está em primeiro lugar na minha vida, pela sua fidelidade, pela sua graça e misericórdia, por suprir todas as minhas necessidades e por manter-me firme na fé e no seu caminho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Emerson Rigoni, pela cooperação, companheirismo e empenho com que se dedicou para avaliar, esclarecer e direcionar-me na elaboração desta monografia.

Ao Prof. Denis Mazzei pelas suas ricas sugestões de aplicação prática das ferramentas de confiabilidade nesta monografia.

A todos os meus companheiros de curso, em especial os colegas da ArcelorMittal Vega, pelas troca de experiências, participação nos trabalhos e ajudas recebidas.

A empresa ArcelorMittal Vega, que nos proporcionou a oportunidade de realização desta pós-graduação e por todos aqueles que de alguma forma se envolveram em alguma etapa deste processo.

Registro neste último parágrafo o agradecimento especial, à minha esposa, às minhas filhas, aos meus pais e aos meus sogros, pelo apoio, compreensão e forças em momentos de dedicação aos estudos, para concluir esta importante etapa da minha vida. Sem este apoio, com certeza seria muito difícil atingir este objetivo.

## RESUMO

THULER, Eliezer Cotrim. **Análise RAM aplicada ao aumento de confiabilidade na linha de galvanização contínua de aços planos.** 2017. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Para este estudo de confiabilidade de ativos foi selecionada uma linha de galvanização contínua de aços planos, composta por sistemas reparáveis para realização de análises dos eventos operacionais e de manutenção. Neste trabalho foram coletadas no banco de dados da empresa, as informações de tempo até falha e tempo de reparo de diversos equipamentos complexos, sendo aplicadas ferramentas de análise de dados de vida, diagrama de blocos e análise RAM (Reliability Availability Maintainability). Como resultado, o trabalho aponta os equipamentos com maior impacto no processo produtivo e propõe a aplicação de ferramentas de engenharia de confiabilidade em determinados equipamentos visando o aumento da confiabilidade e disponibilidade do ativo. Evidencia-se, portanto a engenharia de confiabilidade como ferramenta de gestão importante em busca de melhores resultados, através de metodologias de análise que dão suporte à decisão otimizando assim, a aplicação de recursos financeiros da empresa.

**Palavras-chave:** Confiabilidade e Disponibilidade do Ativo. Linha de Galvanização Contínua. Análise RAM. Engenharia de Confiabilidade.

## ABSTRACT

THULER, Eliezer Cotrim. **RAM analysis application for reliability increase on flat carbon steel continuous galvanizing line.** 2017. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

In order to proceed this asset reliability study, it was selected a flat carbon steel continuous galvanizing line, composed of repairable systems to proceed analysis of operational and maintenance events. In this work, it was collected in company's database, time to fail and time to repair information of some complex systems, being applied life data analysis, block diagrams and RAM (Reliability Availability Maintainability) analysis tools. As a result, this work indicates equipment with higher impact on productive processes and proposes application of reliability engineering tools in some equipment aiming increase of asset reliability and availability. This becomes evident that reliability engineering it's an important management tool for getting better results, through methodologies analysis supporting decision and optimizing company's financial resources application.

**Palavras-chave:** Asset Reliability and Availability. Continuous Galvanizing Line. RAM Analysis. Reliability Engineering.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Bobina de Aço Galvanizado .....	20
Figura 2.2 – Visão Geral da Linha de Galvanização .....	22
Figura 2.3 – Chapa de Aço Galvanizado ao receber o revestimento de Zinco .....	25
Figura 2.4 – Bobina Galvanizada na saída da Linha de Galvanização Contínua .....	27
Figura 3.1 – Dados Completos .....	32
Figura 3.2 – Dados de Censura à Direita .....	33
Figura 3.3 – Dados Censurados em Intervalo .....	34
Figura 3.4 – Dados Censurados à Esquerda .....	35
Figura 3.5 – Função Densidade de Probabilidade (PDF) .....	35
Figura 3.6 – Efeito do Parâmetro de Escala $\eta$ na Distribuição Weibull .....	37
Figura 3.7 – Diagrama de Blocos de Confiabilidade .....	38
Figura 3.8 – Diagrama de Blocos de Confiabilidade .....	38
Figura 3.9 – Configuração de Blocos em Paralelo .....	39
Figura 3.10 – Demonstração da Combinação de Sistemas Série e Paralelo .....	41
Figura 3.11 – Demonstração de Sistemas Complexos .....	41
Figura 3.12 – Modelos dos Componentes e Sistemas .....	43
Figura 3.13 – Seleção de Diagrama RBD Analítico no BlockSim .....	44
Figura 3.14 – Visão Probabilística Randômica de Distribuição Falhas e Reparos ...	45
Figura 4.1 – Metodologia Análise RAM utilizada no estudo de caso .....	46
Figura 4.2 - Tipos de Dados de Confiabilidade para Sistemas Reparáveis .....	48
Figura 4.3 - Criação de Análises no Weibull++ da Reliasoft .....	50
Figura 4.4 - Configuração da planilha de Dados de Confiabilidade (TTF) .....	50
Figura 4.5 - Configuração da planilha de Dados de Manutenibilidade (TTR) .....	51
Figura 4.6 - Carregamento dos dados de confiabilidade (TTF) no Weibull++ .....	51
Figura 4.7 - Carregamento dos dados de manutenibilidade (TTR) no Weibull++ .....	52
Figura 4.8 - Assistente de distribuição do Weibull++ .....	52
Figura 4.9 – Ativação da função publicar modelo no Weibull++ .....	53
Figura 4.10 – Categoria de Modelo para Dados de Confiabilidade(TTF) .....	53
Figura 4.11 – Categoria de Modelo para Dados de Manutenibilidade (TTR) .....	54
Figura 4.12 – Indicação de Modelo Sincronizado no Weibull++ .....	54
Figura 4.13 – Criação de um RBD para Simulação no BlockSim .....	55



Figura 4.14 – Configuração BlockSim para validação dos modelos no Weibull++ ...	55
Figura 4.15 - Validação do modelo utilizado no BlockSim .....	56
Figura 4.16 – Subdiagramas utilizados no BlockSim .....	57
Figura 4.17 - Diagrama de Blocos RBD da Linha de Galvanização no BlockSim ....	57
Figura 4.18 - Resultado da Simulação do RDB no BlockSim .....	58
Figura 4.19 – Curva de falhas do sistema .....	58
Figura 4.20 – Inserção de custos suplementares no BlockSim .....	59
Figura 4.21 – Quadro RS FCI indicação criticidade RS FCI por número de falhas ..	61
Figura 4.22 – Quadro RS DCTI indicação criticidade RS DCTI por tempo de indisponibilidade .....	63

Gráfico 1.1 – Variação do MTBF da Linha de Galvanização Contínua .....	17
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Planilha de modelagem dos dados de falha .....	47
Tabela 4.2 - Cálculo do TTF .....	48
Tabela 4.3 - Cálculo do TTR .....	49
Tabela 4.4 – Índice de criticidade RS FCI por equipamento .....	61
Tabela 4.5 – Índice de criticidade RS DTCl por equipamento .....	62
Tabela 4.6 – Tempo Indisponível do Bloco e Números de Paradas do Sistema .....	64
Tabela 4.7 – Custo das paradas de linha por equipamento .....	65

## LISTA DE SIGLAS

LRU	Lowest Replaceable Unit
PLC	Programmable Logic Controller
HMI	Human Machine Interface
RBD	Reliability Block Diagram
PDF	Probability Density Function
RAM	Reliability Availability Mantenability
TTF	Time to Fail
TTR	Time to Repair
RS FCI	Reliasoft Failure Criticality Index
RS DTCI	Downtime Criticality Index
RCA	Root Cause Analysis

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA.....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos .....	15
1.3	JUSTIFICATIVA .....	16
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA DE AÇOS PLANOS.....</b>	<b>20</b>
2.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO (LAYOUT).....	20
2.2	DESCRIPTIVO DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS.....	23
2.3	CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DO PROCESSO PRODUTIVO	26
2.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	27
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>29</b>
3.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE CONFIABILIDADE .....	29
3.2	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA .....	30
3.2.1	Classificação dos Dados de Vida .....	31
3.2.1.1	Dados Completos .....	31
3.2.1.2	Dados Censurados.....	32
3.2.1.2.1	Dados Censurados à Direita (Suspensão) .....	32
3.2.1.2.2	Dados Censurados em Intervalo .....	33
3.2.1.2.3	Dados Censurados à Esquerda.....	34
3.2.2	Modelos de Distribuição de Dados de Vida.....	35
3.2.3	Estimativa de Parâmetros.....	36
3.3	DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE .....	37
3.3.1	Sistemas em Série .....	38
3.3.2	Sistemas em Paralelo.....	39
3.3.3	Combinação de Sistemas Série e Paralelo .....	40
3.3.4	Sistemas Complexos .....	41
3.4	ANÁLISE RAM .....	42
3.4.1	Modelagem de Sistema .....	42
3.4.2	Diagramas Analíticos.....	43
3.4.3	Diagramas de Simulação .....	44
3.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	45
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>46</b>
4.1	LEVANTAMENTO E PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	46
4.1.1	Dados de Confiabilidade (TTF).....	48
4.1.2	Dados de Mantenabilidade (TTR).....	49
4.2	DETERMINAÇÃO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS E TESTE DE ADERÊNCIA .....	49

4.3	CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO PRODUTIVO NO BLOCKSIM .....	56
4.4	DETERMINAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS MAIS IMPACTANTES NO PROCESSO PRODUTIVO .....	60
4.4.1	Índice de Criticidade da Reliasoft (RS FCI) .....	60
4.4.2	Índice de Criticidade da Reliasoft (RS DTCl).....	62
4.4.3	Tempo Indisponível do Bloco e Número de Paradas do Sistema.....	63
4.4.4	Custo das perdas geradas pelos equipamentos.....	64
4.4.5	Equipamentos mais Impactantes no Processo Produtivo.....	65
4.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	66
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>67</b>
5.1	DIFICULDADE ENCONTRADA.....	68
5.2	BENEFÍCIOS PARA A EMPRESA .....	68
5.3	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	69
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário, as empresas são desafiadas a empregar um grande esforço de melhoria contínua para se manterem competitivas num mercado globalizado. A realização das mesmas atividades da mesma forma gera sempre os mesmos resultados. É necessário, portanto, buscar novas alternativas para maximizar a utilização do ativo e elevar a performance das linhas de produção para melhores patamares. Pensando nisto, ferramentas e metodologias de análise quantitativas avançadas de confiabilidade devem ser utilizadas para auxílio na tomada de decisões e priorização dos ativos mais impactantes no processo fabril, de modo a atingir o aumento da confiabilidade e disponibilidade dos ativos. Devido ser a linha de produção que gera maior valor agregado para o produto (bobinas de aço galvanizado), a linha de galvanização contínua de aços planos foi escolhida para aplicação destas técnicas de confiabilidade e o presente trabalho engloba a análise de ocorrências operacionais e de manutenção de forma a compreender as influências dos diversos equipamentos no resultado da performance da linha.

### 1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

A empresa de aplicação deste estudo de caso é do Grupo ArcelorMittal e esta linha de galvanização é um dos processos que requer maiores índices de confiabilidade com grande exigência de qualidade devido ser o produto final destinado às indústrias automotivas e de linha branca. Além disso, em todos os casos de parada de produção, há geração de sucata.

O estudo proposto apresenta a análise prática desta linha contínua de grande extensão, que possui vários equipamentos complexos, com alto nível de automação, não sendo uma tarefa simples a determinação de canalizar os recursos e tratativas para estes equipamentos de forma otimizada.

Observa-se nesta empresa uma estruturação com práticas e metodologias aplicadas nos segmentos de operação e manutenção. Existe um sistema de manutenção com planos de manutenção, programação e controle de eventos, como por exemplo, realização de paradas preventivas mensais e duas grandes paradas anuais. Ferramentas de análise de falha são aplicadas, reuniões de

acompanhamento diário entre operação e manutenção, compreendendo assim um conjunto de boas práticas na organização.

O que se observa, em meio a esta estruturação é que existe a necessidade de melhorar o resultado, o que não é trivial. As metodologias existentes para análise de todo o sistema não são suficientemente eficazes para diagnosticar com maior profundidade e critério os fatores ou equipamentos responsáveis que impactam na confiabilidade de modo a direcionar, ou apurar com acurácia, o que, de fato deve ser observado ou trabalhado para elevar os patamares de confiabilidade da linha.

Em virtude do variado número de falhas em diferentes equipamentos, há suposições, percepções que levam as pessoas a direcionar esforços para determinados equipamentos, porém sem o devido embasamento teórico.

As dificuldades enfrentadas atualmente são a falta de conhecimento de aplicação de ferramentas de confiabilidade, e a inexistência de um banco de dados que retrate o registro de tempos até falha e tempos de reparo a nível de componentes (LRU – *Lowest Replaceable Unit*).

Diante do grande número de equipamentos existentes na linha de galvanização contínua e de ocorrências de parada e tempos de parada diversos, como determinar de forma assertiva os principais “*bad actors*” com impacto no resultado da linha?

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e específico do presente trabalho é apresentado a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar os ativos que mais impactam no resultado de confiabilidade e disponibilidade da linha de galvanização contínua através da aplicação de ferramentas de confiabilidade quantitativa.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral, as seguintes etapas serão foram realizadas:

1. Levantar informações quantitativas de falhas e reparos dos ativos existentes na linha de galvanização contínua, através do banco de dados da empresa;
2. Modelar os dados em uma planilha para realização do cálculo dos tempos até falha e tempos de reparos;
3. Aplicar os dados obtidos acima no software Weibull++ para verificar a melhor distribuição de vida estatística que representa as curvas de confiabilidade dos ativos;
4. Construir o diagrama de blocos no BlockSim a fim de visualizar o modelo matemático que descreve a probabilidade de falha de todo sistema;
5. Utilizar a análise RAM para determinar quais os ativos que mais impactam na confiabilidade e disponibilidade da linha;
6. Propor a aplicação de ferramentas de confiabilidade nos subsistemas do ativo selecionado.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Na empresa em questão existem alguns processos produtivos. Dentre estes processos, a linha de galvanização contínua foi escolhida, pois se observa, ao longo do tempo, uma variação do MTBF, que acarreta na instabilidade do processo que, além da parada em si, ocasiona a geração de sucata, significando uma grande perda para o negócio. Tal impacto se torna relevante, visto que, para a produção deste aço se utiliza um dos insumos mais caros do parque fabril, os lingotes de zinco. Sendo assim, a geração de sucata ocasionada pelas paradas gera a perda não só do aço, mas também do zinco aderido na chapa.

A melhoria na estabilidade operacional da linha, assim como a aquisição do conhecimento pela aplicação das técnicas de confiabilidade, que este estudo propõe possibilita a geração de vários ganhos, como:

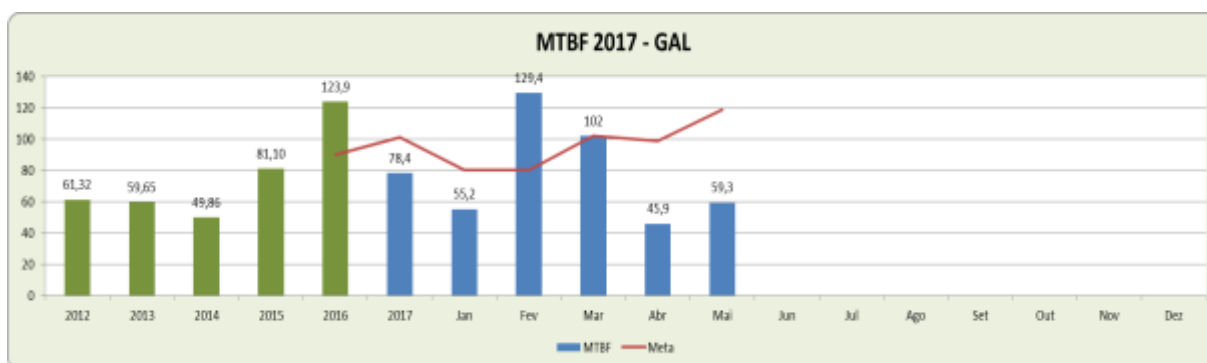
- Aumento de produção;
- Redução na geração de sucata;
- Redução do número de falhas e do tempo para reparo;



- Diminuição do custo com manutenção corretiva;
- Diminuição do custo do produto;
- Maior foco da manutenção em ações e programas estruturantes, como aplicação de RCM e outras ferramentas de confiabilidade;
- Aumento do resultado financeiro (ebitda) do negócio.

No gráfico 1.1, é possível observar um dos fatores que mais motivaram a realização deste estudo.

Gráfico 1.1 – Variação do MTBF da Linha de Galvanização Contínua



Fonte: o autor (2017).

Observa-se, que o processo produtivo apresenta ao longo dos meses de 2017 grande variabilidade do MTBF, o que sugere oportunidade de melhoria do resultado de confiabilidade.

#### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos utilizados neste estudo possuem as seguintes classificações:

- Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa, uma vez que enfatiza a objetividade, a coleta e análise dos dados com ferramentas estatísticas;
- Quanto à natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar tratativas para uma aplicação prática com problemas específicos da Linha de Galvanização Contínua de Aços Planos;

- Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa explicativa, devido buscar identificar os fatores que mais contribuem para impactar no resultado final da performance da linha de produção;
- Quanto aos procedimentos, o projeto trata de uma pesquisa de campo, pois tem como base as investigações oriundas de coletas de dados históricos de falha para a posterior análise dos diferentes comportamentos nos equipamentos observados.

Primeiramente será realizada a coleta dos dados históricos do processo produtivo dos anos de 2016 e metade do ano de 2017, que será obtida através do banco de dados de paradas produtivas da empresa. Após a coleta dos dados, será feita uma organização de forma a considerar as paradas produtivas emergenciais sob responsabilidade da manutenção e operação, explicitando assim os equipamentos mais críticos, objeto deste trabalho.

Subsequentemente, estes dados serão preparados de forma a conter os tempos de parada e tempos de reparo de cada equipamento, estando prontos para serem utilizados no software Weibull++ e BlockSim da Reliasoft.

Testes de aderência, levantamento das melhores distribuições estatísticas, diagramas de blocos e análise RAM serão realizados para análise da confiabilidade.

Finalmente, com a aplicação das ferramentas de análise quantitativa da confiabilidade, pretende-se, então evidenciar os resultados e propor ações que permitam direcionar esforços nos equipamentos que realmente estão impactando no resultado de performance da linha de galvanização contínua de aços planos.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Os capítulos iniciais apresentam informações de caráter geral do estudo proposto, caracterizando a real necessidade, assim como o local de aplicação, uma linha de galvanização contínua de aços planos, e ressaltando os objetivos gerais e específicos esperados, além dos motivos que justificam a realização deste estudo.

- O Capítulo 2 apresenta informações sobre o processo e características do produto de saída com maior nível de detalhes, assim como a explicação

dos principais subsistemas complexos de modo a proporcionar um melhor entendimento da abrangência e impacto do trabalho;

- O Capítulo 3 contém um referencial teórico das principais ferramentas de confiabilidade utilizadas, como Análise de Dados de Vida, o diagrama de blocos (BlockSim) e a análise RAM, que suportam o desenvolvimento do trabalho para a obtenção do resultado desejado;
- O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do trabalho na sequência de realização, contendo: a forma de obtenção dos dados e tratamentos realizados, a aplicação das ferramentas de confiabilidade e os resultados obtidos com os fatos analisados;
- O Capítulo 5 finaliza o trabalho mostrando as soluções definidas, as proposições de sequência de aplicação das ferramentas de confiabilidade, assim como a conclusão e os benefícios alcançados para o processo e para a empresa.

## 2 LINHA DE GALVANIZAÇÃO CONTÍNUA DE AÇOS PLANOS

Neste capítulo será explanado, com maior nível de detalhamento, a respeito do processo produtivo, objeto de aplicação deste estudo. Serão abordados detalhes da linha de galvanização contínua e seu layout, assim como informações sobre os principais equipamentos e suas características mais importantes.

### 2.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO (LAYOUT)

A linha de galvanização contínua consiste no processamento de bobinas de aço laminadas a frio, que serão transformadas em bobinas galvanizadas, devido receberem um revestimento de uma camada de zinco em ambas as faces, sendo este produto amplamente utilizado no setor automotivo e indústria.

Figura 2.1 – Bobina de Aço Galvanizado



Fonte: Vega - ArcelorMittal, 2017.

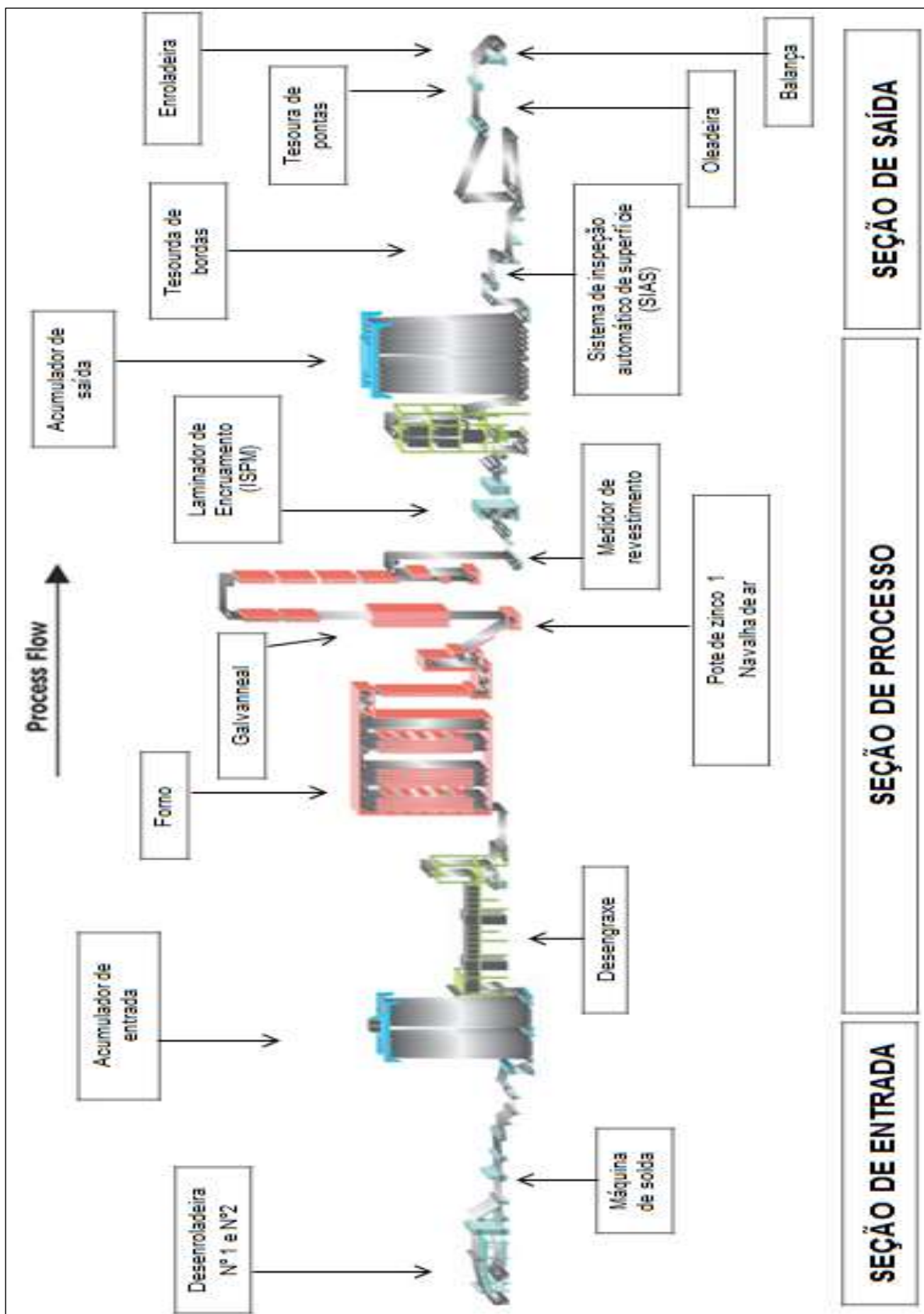
Este processo produtivo possui 270 metros de extensão, assim como uma grande quantidade de equipamentos diversificados e com diferentes funções para o processamento das bobinas de aço.

Esta linha é dividida em 3 seções, conforme figura 2.2, possuindo a Seção de Entrada, Seção de Processo e Seção de Saída. A Seção que determina a velocidade de produção, e conseqüentemente a produtividade da linha, é a seção de processo, com menor velocidade, a qual é alimentada pela seção de entrada e fornece chapa para a seção de saída. Como se trata de uma linha contínua, a seção de processo roda constantemente, suportada pelos acumuladores de chapa.

Ao iniciar nova bobina, a seção de entrada roda em alta velocidade enchendo o acumulador de entrada. No final desta bobina, a seção de entrada reduz sua velocidade para realização de solda na cauda desta com a ponta da nova bobina. Neste momento, o acumulador de entrada, que estava cheio vai se esvaziando lentamente, suprindo a seção de processo que trabalha com velocidade constante. Ao finalizar a solda na entrada o ciclo se repete.

Por semelhante modo, ao parar a seção de saída para retirar a bobina, o acumulador de saída é controlado de modo a ficar vazio, o processo se mantém rodando e enchendo o acumulador. Este ciclo se repete novamente na próxima retirada de bobina.

Figura 2.2 – Visão Geral da Linha de Galvanização



Fonte: o autor (2017).

A figura 2.2 apresenta o layout da Layout da Linha de Galvanização, sendo possível observar como os equipamentos estão dispostos neste fluxo contínuo de produção de bobinas revestidas.

## 2.2 DESCRITIVO DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos que constituem este processo possuem tecnologias avançadas, com elevado nível de automação e instrumentação (diversos tipos de sensores, controladores lógicos programáveis, motores, bombas, inversores) além dos componentes mecânicos.

São apresentadas a seguir explicações a respeito dos principais equipamentos que compõem a linha de galvanização contínua e suas funções:

- **Desenroladeira:** localizada na seção de entrada, possui a função de desenrolar as bobinas com velocidade e tensão reguladas alimentando o processo. Possui um mandril expansível, uma redutora, além de sensores, motor e inversor de frequência.
- **Máquina de Solda:** está localizada na linha de passe comum, após as linhas de passe 1 e 2. Sua função é de realizar a união da ponta de uma nova bobina com a extremidade (cauda) da que está em processamento. Trata-se de um equipamento crítico da linha, pois em casos de ruptura da solda, há a perda da linha de passe, gerando paradas de tempos elevados. Esta máquina de solda é operada automaticamente, com elevado nível de automação. Possui um C-Frame que se move para realizar a solda, uma tesoura, unidades de clamping para fixar a ponta e cauda, transformador de solda, mesa de looping, centralizadores, além de outros equipamentos.
- **Acumulador de Entrada:** localizado após a máquina de solda, possui a função de acumular chapa, permitindo a operação da seção de processo na velocidade nominal durante a parada da seção de entrada para receber a nova bobina. Trata-se de um acumulador vertical, que possui um sistema de rolos fixos na fundação e rolos montados na plataforma vertical móvel. A chapa é interligada de cada rolo fixo para o rolo móvel,

na sequência do fluxo do processo permitindo assim a acumulação de grande quantidade de material quando a plataforma móvel está na posição elevada. Possui um conjunto de polias com cabo de aço para sustentar a plataforma vertical, acionadas por um motor e redutor, além de um sistema de contrapeso e sensores fim de curso.

- **Desengraxe:** após o acumulador de entrada, está a unidade de desengraxe com a função de remover finos de ferro e óleo de laminação antes de iniciar o próximo processo de recozimento no forno. Possui rolos escova, e tanques para injetar, por meio de bicos spray, solução de desengraxe na chapa, além de uma seção de limpeza eletrolítica. É uma área com elevado nível de instrumentação para controle das soluções, como temperatura, ph, condutividade, etc.
- **Forno:** localizado na seção de processo, o forno de recozimento é um equipamento de grande dimensão com a finalidade aquecer a chapa, provocar seu resfriamento, recozendo o material e preparando a chapa para receber o revestimento de zinco. Possui vários rolos, além de queimadores a gás e aquecimento elétrico. É um equipamento com elevado nível de instrumentação.
- **Pote de Zinco:** possui a finalidade de armazenar zinco líquido à alta temperatura e receber a chapa que será revestida conforme especificado pelo cliente.
- **Medidor de revestimento:** possui a função de medir a camada de revestimento na face superior e inferior da chapa. Durante o processamento do material, o medidor realiza varredura de uma extremidade à outra da chapa para identificar os valores de revestimento em toda largura.
- **Laminador de Encruamento:** localizado após o medidor de revestimento, possui uma cadeira de laminação com a função de encruar a chapa de aço através de tensionamento e aperto aplicados para permitir sua utilização no cliente tornando-a adequada para ser deformada (estampada).
- **Tesoura de Bordas:** localizada na região de saída, possui lâminas que realizam corte contínuo na lateral da largura, proporcionando a largura



visada pelo cliente. Possui equipamentos mecânicos, motores elétricos e sensores para realizar ajuste do corte.

- **Oleadeira:** possui a função de aplicar uma camada de óleo na chapa de aço de modo a promover uma película de proteção contra corrosão. Possui tanques de armazenamento de óleo, bomba dosadora, além de sensores de temperatura, nível, etc.
- **Rolos Tensores:** são vários conjuntos existentes ao longo da linha, formados por alguns rolos que tem a função de tracionar a chapa no processo. Possuem motores, redutores, freios elétricos, além do sensoriamento necessário.
- **Centralizadores:** são equipamentos existentes ao longo da linha. Possuem sensores indutivos, os quais verificam a posição da chapa e promovem sua correção para o centro da linha.
- **Enroladeira:** localizada na seção de saída, possui a função de enrolar as bobinas com velocidade e tensão reguladas para retirar a chapa do processo. Possui um mandril expansível, uma redutora, além de sensores, motor e inversor de frequência.

Figura 2.3 – Chapa de Aço Galvanizado ao receber o revestimento de Zinco



Fonte: Vega - ArcelorMittal, 2017.

Além dos equipamentos supracitados, há vários sistemas comuns à toda linha de galvanização, como por exemplo, sistema de controladores lógicos (PLC –

*Programmable Logic Controller*) conectados em rede para controlar todos os acionamentos, sistemas supervisórios (HMI – *Human Machine Interface*) utilizados para operar o processo, sistema de aquisição de dados para armazenamento das variáveis do processo, sistema de nível 2 que recebe os dados e *preset's* das próximas bobinas a serem processadas, etc.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DO PROCESSO PRODUTIVO

No processo contínuo em estudo descrito acima, pode-se observar que é necessário o funcionamento de todos os equipamentos para permitir o fluxo de produção normal. A ocorrência de falhas funcionais em cada um destes equipamentos acarretará na parada de produção.

As paradas de linha referem-se aos eventos de parada da seção de processo, ocasionados por qualquer uma das seções (entrada, processo e/ou saída). Paradas controladas dentro de um tempo estimado nas seções de entrada e saída não geram paradas no processo e são necessárias para recebimento da nova bobina e retirada da bobina processada, respectivamente.

As paradas no processo produtivo têm impacto na qualidade do produto. Isto significa que, ao retornar o processo produtivo após uma parada de linha, as primeiras toneladas de produção são descartadas como sucata, devido ser necessário retirar a parte do material que ficou com as características de revestimento fora do especificado ocasionados pela parada da seção de processo.

Existem algumas falhas, que não provocam a parada de linha, porém reduzem a velocidade de processo e são chamadas de “marcha lenta”, reduzindo a produtividade da linha de produção. No estudo em questão estão sendo consideradas somente as paradas de linha.

Diversos tipos de produtos são produzidos na linha de galvanização contínua, com variações na composição da liga de aço dos materiais, espessura, largura, revestimento visado e outros. Atualmente, há uma crescente demanda por materiais de alta resistência (maior dureza), tendência mundial de utilização de aços mais leves aplicados no setor automotivo que contribuem para redução nos níveis de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Com esta tendência de alteração no mix de produtos acontecendo, há uma diminuição na produtividade (ton/h), que deve ser

compensada com uma maior confiabilidade para que se mantenha a atratividade do negócio.

Figura 2.4 – Bobina Galvanizada na saída da Linha de Galvanização Contínua



Fonte: Vega - ArcelorMittal, 2017.

A figura 2.4 apresenta uma bobina na saída do processo de Galvanização onde está sendo colocada uma cinta para impedir a abertura da espira no momento do transporte. Trata-se do produto acabado, que será embalado e expedido para o cliente final.

## 2.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordada a descrição do processo produtivo em estudo, com a explanação de detalhes do funcionamento do fluxo produtivo para transformação de bobinas de aço laminadas a frio em bobinas galvanizadas, incluindo uma visão geral com o layout, a descrição dos principais equipamentos utilizados e algumas características importantes para o entendimento do estudo de caso.

O conteúdo abordado neste capítulo foi de substancial contribuição para compreensão dos impactos que o processo e os equipamentos apresentam no resultado de performance da linha afetando a disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade.

As funções desempenhadas por cada equipamento, assim como a contribuição de cada um no contexto geral de todo processo são importantes para

aumentar a percepção e entendimento dos resultados que serão apresentados no decorrer deste estudo.

O próximo capítulo tratará do referencial teórico com conceitos e ferramentas que serão aplicados para desenvolvimento da análise RAM, provendo o embasamento necessário para a elaboração e análise do estudo de caso em questão.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será explanado o referencial teórico da engenharia de confiabilidade e serão abordadas as ferramentas de confiabilidade quantitativa utilizadas no desenvolvimento deste estudo de caso, provendo o embasamento teórico necessário, que inclui os Conceitos Fundamentais de Confiabilidade, a Análise de Dados de Vida e a Análise RAM.

#### 3.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE CONFIABILIDADE

Confiabilidade é a probabilidade de um item operar por um determinado tempo sem falhas. Mais genericamente, confiabilidade é a capacidade de partes, componentes, equipamentos, produtos e sistemas realizarem suas funções requeridas por períodos de tempo desejados sem falha, em ambientes específicos e com a confiança desejada.

Confiabilidade também é definida como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo (NBR5462 – 1994).

O estudo da confiabilidade quantitativa envolve métricas importantes, as quais permitem descrever e quantificar o comportamento dos dados em análise envolvendo o conhecimento dos seus tempos até a falha.

As principais métricas de confiabilidade são (Reliasoft, 2017):

- **Confiabilidade,  $R(t)$** : Probabilidade de funcionar até o tempo “t” selecionado e na mesma condição operacional analisada;
- **Probabilidade de Falha,  $F(t)$** : Probabilidade de falhar até o tempo “t” observado e dentro da mesma condição operacional analisada;
- **Vida  $BX(\%)$** : Intervalo de tempo em que se observa o X% de não confiabilidade (10% das falhas ocorrerão até o intervalo B10);
- **Vida Média (MTTF)**: Tempo médio esperado para uma falha ocorrer em um item sob suas condições operacionais;
- **Vida Mediana**: Tempo em que 50% das falhas são esperadas;

- **Confiabilidade Condicional  $R(t|T)$** : Probabilidade de funcionar até um tempo adicional “t”, dado que o item já funcionou, com sucesso, durante um intervalo de tempo “T”;
- **Taxa de Falha  $\lambda(t)$** : Risco de falhar em um intervalo de tempo infinitamente curto (quase zero) dado que este mesmo item não falhou até então.

Tais métricas são amplamente utilizadas em estudos e análises de confiabilidade sendo na maioria dos casos, obtidas via software devido à alta complexidade matemática envolvida neste assunto.

### 3.2 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Este tema se refere ao estudo e modelamento da vida de produtos ou equipamentos observados. No caso de equipamentos, trata-se do tempo que este opera antes de entrar em falha. Estes tempos de vida podem ser medidos em horas, dias, quilômetros, ciclos ou qualquer outra métrica com a qual a vida ou a aplicação possa ser medida. A análise posterior destes dados e a estimativa de vida são conhecidas como “Análise de Dados de Vida”.

A análise de dados de vida consiste, portanto, em tratar as informações de vida observada através do modelamento de uma distribuição estatística que se ajusta melhor à uma amostra representativa dos dados de vida. A distribuição parametrizada para os dados pode então ser usada para estimar importantes características do item, tal como, confiabilidade ou probabilidade de falhas em um determinado tempo, a vida média e a taxa de falhas.

A análise de dados de vida requer:

- Obtenção dos dados de vida do produto;
- Seleção de uma distribuição estatística que corresponda aos dados e modele a vida do produto;
- Estimativa de parâmetros que ajustem a distribuição aos dados;
- Geração de gráficos e resultados que estimem a vida característica do produto, como a confiabilidade ou a vida média.

### 3.2.1 Classificação dos Dados de Vida

Modelos estatísticos se baseiam unicamente nos dados para realizar a estimativa. Em análise de dados de vida, os modelos são distribuições estatísticas e os dados são dados de vida ou dados de tempo até a falha do produto. A precisão de qualquer estimativa é diretamente proporcional à qualidade, precisão e integridade dos dados fornecidos. Bons dados juntamente com a escolha de um modelo apropriado geralmente resultam em boas estimativas. Dados insuficientes ou ruins irão quase sempre gerar estimativas não adequadas.

Em análise de dados de vida, pretende-se utilizar todos os dados disponíveis, os quais algumas vezes são completos ou incluem incertezas de quando a falha ocorreu.

Dados de vida podem, entretanto, ser separados em 2 tipos:

- Dados completos (todas informações disponíveis) ou
- Dados censurados (algumas informações estão ausentes).

Estes tipos são explicados a seguir.

#### 3.2.1.1 Dados Completos

Dados completos significam que o valor de cada unidade da amostra é observado ou conhecido. Por exemplo, se fosse computada a média das notas de 10 alunos, dados completos iriam consistir em conhecer a nota de cada estudante. Igualmente no caso de análise de dados de vida, nosso conjunto de dados (se completo) seria composto por tempos até a falha de todas as unidades de nossa amostra. Por exemplo, se fossem testadas cinco unidades e todas elas falhassem (e seus tempos até a falha fossem registrados), haveria então informações completas como o tempo de cada falha na amostra.

Figura 3.1 – Dados Completos



Fonte: Reliawiki, 2017.

A figura 3.1 ilustra os dados de falha, indicando cinco falhas ocorridas e os tempos até a falha de cada unidade, que são conhecidos, tratando-se, portanto, de dados completos.

### 3.2.1.2 Dados Censurados

Em muitos casos, todas as unidades na mesma amostra podem não ter falhado (o evento de interesse não foi observado) ou os tempos exatos até a falha de todas as unidades não são conhecidos. Este tipo de dados é comumente chamado de dados censurados.

Existem três tipos de dados censurados:

- Censura à direita (também conhecidos como dados suspensos)
- Censura no intervalo
- Censura à esquerda

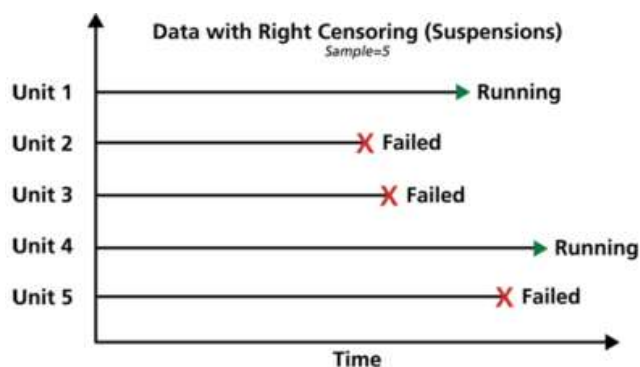
#### 3.2.1.2.1 Dados Censurados à Direita (Suspensão)

O caso mais comum de censura se refere aos dados censurados à direita, ou dados suspensos. No caso dos dados de vida, estes conjuntos de dados são compostos de unidades que não falharam. Por exemplo, se foram testadas cinco unidades e somente três falharam ao final do teste, seriam dados censurados à direita (ou dados suspensos) as duas unidades que não falharam. O termo censura à direita significa que o evento de interesse (o tempo até a falha) está à direita do instante de observação dos dados. Em outras palavras, se as unidades se mantêm



em operação, a falha poderia ocorrer algum tempo após o instante de observação dos dados (ou à direita na escala do tempo).

Figura 3.2 – Dados de Censura à Direita



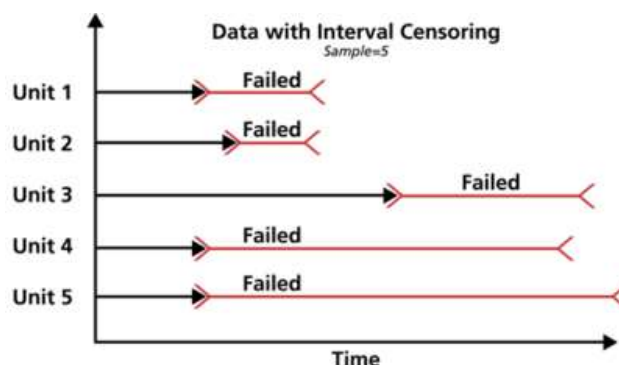
Fonte: Reliawiki, 2017.

No exemplo mostrado na figura 3.2 é possível observar que as unidades 2, 3 e 5 se referem a dados completos, pois apresentaram falha num tempo conhecido. As unidades 1 e 4 são dados censurados à direita, pois no tempo da observação, estas continuam em funcionamento e sua falha ocorrerá à direita deste tempo.

### 3.2.1.2.2 Dados Censurados em Intervalo

O segundo tipo de censura é comumente chamado de dados censurados em intervalo. Dados censurados em intervalo reflete incerteza nos tempos exatos que as unidades falharam dentro de um intervalo. Este tipo de dados frequentemente vem de testes ou situações onde os objetos de interesse não são constantemente monitorados. Por exemplo, ao realizar um teste em cinco unidades e inspecioná-las a cada 100 horas, somente sabe-se que a unidade falhou ou não falhou entre as inspeções. Especificamente, ao inspecionar certa unidade com 100 horas, encontrá-la operando, e então realizar outra inspeção com 200 horas e encontrar que a unidade não está mais operando, então a única informação que se tem é que a unidade falhou em algum tempo no intervalo entre 100 e 200 horas. Este tipo de dados censurados é chamado também de *dados de inspeção* por alguns autores.

Figura 3.3 – Dados Censurados em Intervalo



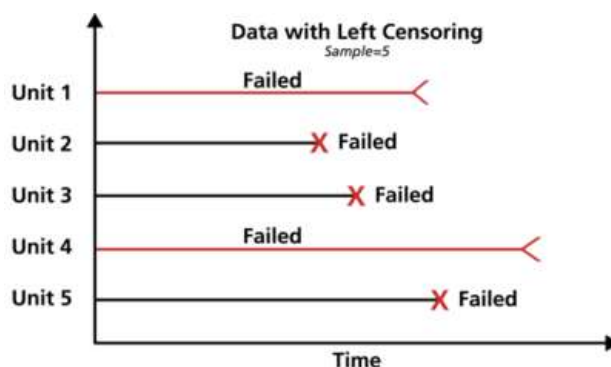
Fonte: Reliawiki, 2017.

É geralmente recomendado evitar dados censurados em intervalo, pois eles são menos informativos comparados aos dados completos. Entretanto, existem casos quando intervalos de dados são inevitáveis devido à natureza do produto, do teste e do equipamento. Nestes casos, atenção deve ser tomada para ajustar os intervalos de inspeção reduzidos o bastante para observar o comportamento das falhas. Por exemplo, se o intervalo de inspeção é muito longo, todas as unidades no teste poderão falhar dentro deste intervalo e, assim, nenhuma distribuição de falhas poderá ser obtida.

### 3.2.1.2.3 Dados Censurados à Esquerda

O terceiro tipo de censura é similar à censura de intervalo e é chamado de dados censurados à esquerda. Nos dados censurados à esquerda, o que se sabe é que o tempo da falha ocorreu antes de um tempo específico. Por exemplo, sabe-se que determinada unidade falhou algum tempo antes de 100 horas, mas não se sabe exatamente quando. Em outras palavras, a falha pode ter ocorrido num tempo entre 0 e 100 horas. Isto é idêntico aos dados censurados em intervalo, no casos em que o tempo de início para o intervalo é zero.

Figura 3.4 – Dados Censurados à Esquerda



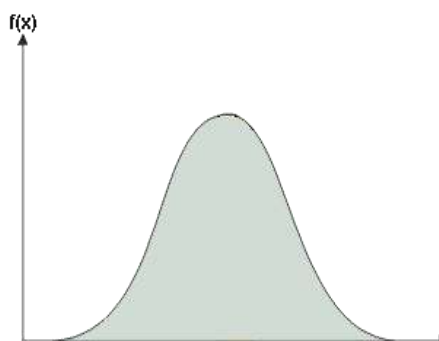
Fonte: Reliawiki, 2017.

Na figura 3.4, para as unidades 2, 3 e 5, sabe-se o momento de ocorrência da falha. Nos casos das unidades 1 e 4, o que se sabe é que a falha ocorreu antes do período de observação, porém não se sabe o momento exato de sua ocorrência, ou seja, trata-se de dados censurados à esquerda.

### 3.2.2 Modelos de Distribuição de Dados de Vida

Distribuições estatísticas são formuladas para modelar ou representar determinado comportamento. A função de densidade de probabilidade (pdf) é uma função matemática que descreve a distribuição. A pdf pode ser representada matematicamente ou em um gráfico onde o eixo x representa o tempo como mostrado a seguir:

Figura 3.5 – Função Densidade de Probabilidade (PDF)



Fonte: Weibul, 2017.

Algumas distribuições, como Weibull e Lognormal, tendem a representar melhor os dados de vida e são comumente chamadas de “distribuições de dados de

vida” ou “distribuições de vida”. De fato, análise de dados de vida é algumas vezes chamada de “Análise Weibull”, pois a distribuição Weibull, formulada pelo professor Waloddi Weibull, é uma distribuição popular para análise de dados de vida. O modelo Weibull pode ser aplicado em uma variedade de formas (incluindo 1 parâmetro, 2 parâmetros, 3 parâmetros ou Weibull mista). Outras distribuições de vida comumente utilizadas incluem as distribuições exponencial, lognormal e normal. O responsável pela análise escolhe a distribuição mais adequada para modelar cada conjunto de dados baseado em experiência e no teste de aderência.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}}$$

1

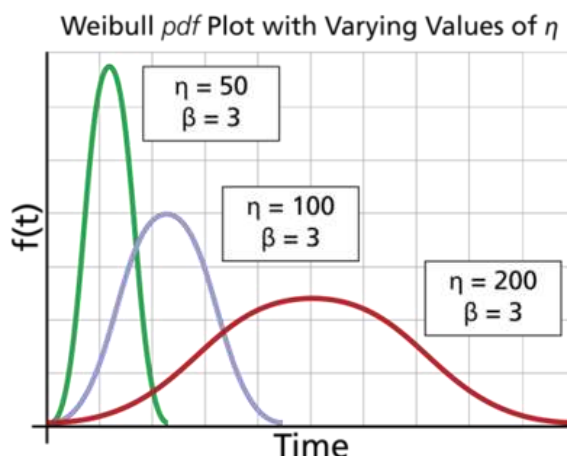
A equação 1 representa uma pdf de 3 parâmetros de uma distribuição Weibull.

### 3.2.3 Estimativa de Parâmetros

Com a finalidade de ajustar a conformidade de um modelo estatístico a um conjunto de dados de vida, o analista estima os parâmetros da distribuição de vida que tornará a função mais aderente aos dados. Os parâmetros controlam a escala, a forma e a localização da função pdf. Por exemplo, no modelo Weibull de 3 parâmetros (mostrado acima), tem-se:

- $\eta$  (eta) é o parâmetro de escala ou vida característica, que define onde a maior parte da distribuição falha. Possui a mesma unidade de t;
- $\beta$  (beta) é o parâmetro de forma ou inclinação, que define a forma da distribuição, sendo um número adimensional;
- $\gamma$  (gama) é o parâmetro de localização ou vida livre de falha, que define a localização da distribuição no tempo, ou seja, representa um deslocamento no eixo x, trasladando o início da distribuição para um valor diferente de zero. Possui a mesma unidade de t.

Figura 3.6 – Efeito do Parâmetro de Escala  $\eta$  na Distribuição Weibull



Fonte: Reliawiki, 2017.

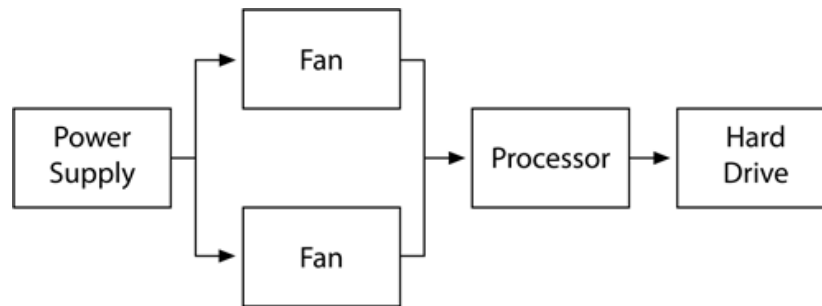
Vários métodos têm sido desenvolvidos para estimar os parâmetros que irão ajustar uma distribuição de vida à um conjunto de dados em particular. Alguns métodos de estimativa de parâmetros disponíveis incluem gráficos de probabilidade, análise de regressão em X (RRX), análise de regressão em Y (RRY) e estimativa da máxima verossimilhança (MLE). O método de análise apropriado irá variar dependendo do conjunto de dados e, em alguns casos, da distribuição de vida selecionada.

### 3.3 DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE

Diagramas de blocos são amplamente utilizados em engenharia e ciência e existe em várias formas diferentes. Eles podem também ser usados para descrever a inter-relação entre os componentes e para definir o sistema. Quando usado desta maneira, o diagrama de blocos é então conhecido como diagrama de bloco de confiabilidade (RBD – *Reliability Block Diagram*).

Um diagrama de blocos de confiabilidade é uma representação gráfica dos componentes de um sistema e como eles estão logicamente conectados sob o aspecto da confiabilidade. Deve-se notar que o diagrama pode ser diferente em relação à forma como os componentes estão conectados fisicamente. É mostrado abaixo um RDB de um sistema simplificado de computador com uma configuração de ventilador redundante.

Figura 3.7 – Diagrama de Blocos de Confiabilidade



Fonte: Reliawiki, 2017.

No exemplo da figura 3.7, observa-se um sistema modelado com a representação lógica dos seus componentes utilizando combinações em série e em paralelo.

### 3.3.1 Sistemas em Série

Na configuração em série, a falha de qualquer componente resulta na falha de todo sistema. Isto significa que, todas as unidades em um sistema em série devem funcionar para que o sistema funcione.

Figura 3.8 – Diagrama de Blocos de Confiabilidade



Fonte: Reliawiki, 2017.

A confiabilidade do sistema é a probabilidade que a unidade 1 funcione e a unidade 2 funcione e todas as unidades do sistema funcionem. Então, todas as unidades devem funcionar para que o sistema funcione.

A confiabilidade do sistema para componentes estatisticamente independentes é dada por:

$$R_s = P(X_1)P(X_2)...P(X_n) \quad 2$$

ou

$$R_s = \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad 3$$

Ou, em termos de confiabilidade de componente individual:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i$$

4

Onde:

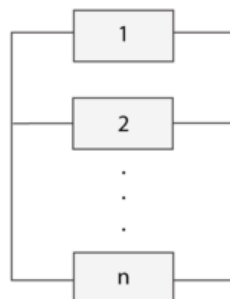
- $R_s$  é a confiabilidade do sistema
- $X_i$  é o evento da unidade  $i$  sendo operacional
- $P(X_i)$  é a probabilidade que a unidade  $i$  seja operacional

Em outras palavras, para um sistema em série puro, a confiabilidade do sistema é igual ao produto das confiabilidades dos componentes que o constitui.

### 3.3.2 Sistemas em Paralelo

Em um sistema paralelo simples, como mostrado na figura 3.9, pelo menos uma das unidades deve funcionar para que o sistema funcione. Unidades em paralelo também são conhecidas como unidades redundantes. Redundância é um aspecto muito importante de uma concepção de sistema e confiabilidade onde, a adição de redundância é um dos vários métodos de aumentar a confiabilidade do sistema.

Figura 3.9 – Configuração de Blocos em Paralelo



Fonte: Reliawiki, 2017.

A probabilidade de falha, ou não confiabilidade, para um sistema com  $n$  componentes paralelos independentes é a probabilidade que a unidade 1 falhe e a

unidade 2 falhe e todas as outras unidades no sistema falhem. Então, em um sistema em paralelo, todas as  $n$  unidades devem falhar para o sistema falhar. De outra forma, se a unidade 1 funcionar ou a unidade 2 funcionar ou alguma das  $n$  unidades funcionarem, então o sistema funciona. A não confiabilidade de um sistema para componentes estatisticamente independentes é dada por:

$$Q_s = P(X_1)P(X_2)\dots P(X_n) \quad 5$$

ou

$$Q_s = \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad 6$$

Ou, em termos de não confiabilidade de componente:

$$Q_s = \prod_{i=1}^n Q_i \quad 7$$

Onde:

- $Q_s$  é a não confiabilidade do sistema
- $X_i$  é o evento de falha da unidade  $i$
- $P(X_i)$  é a probabilidade de falha da unidade  $i$

Observe o contraste com o sistema série, no qual a confiabilidade do sistema foi o produto das confiabilidades dos componentes; enquanto o sistema paralelo tem a não confiabilidade como o produto das não confiabilidades dos componentes.

A confiabilidade de um sistema paralelo é dada por:

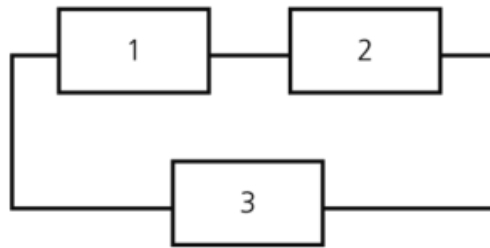
$$\begin{aligned} R_S &= 1 - Q_S = 1 - (Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n) \\ &= 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)] \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \end{aligned} \quad 8$$

### 3.3.3 Combinação de Sistemas Série e Paralelo

Estes sistemas podem ser analisados pelo cálculo das confiabilidades individuais dos sistemas em série e dos sistemas em paralelo e então os combinando de maneira apropriada.



Figura 3.10 – Demonstração da Combinação de Sistemas Série e Paralelo



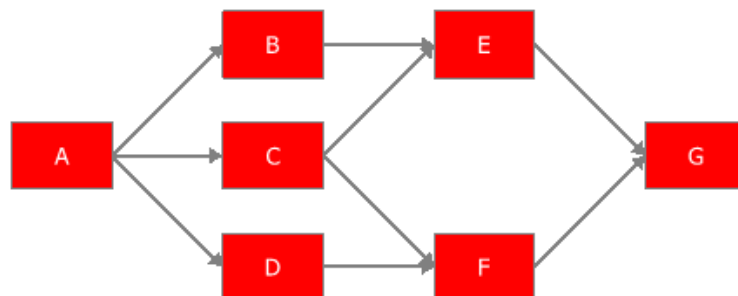
Fonte: Reliawiki, 2017.

É possível observar na figura 3.10 um caso simples da combinação dos componentes 1 e 2 em série, onde a sua resultante se encontra em paralelo com o componente 3.

### 3.3.4 Sistemas Complexos

Em muitos casos, não é fácil reconhecer quais componentes estão em série a quais estão em paralelo em um sistema complexo. O esquema da figura 3.11 mostra um bom exemplo de um sistema complexo.

Figura 3.11 – Demonstração de Sistemas Complexos



Fonte: Reliawiki, 2017.

O sistema da figura acima não pode ser quebrado em grupos de sistemas em série e paralelo. Isto é devido ao fato do componente C ter 2 caminhos partindo dele, ao passo que B e D têm somente um. Neste caso existe a necessidade de métodos específicos para resolução destes sistemas complexos. Estes métodos são bastante trabalhosos e consomem muito tempo, portanto para estas análises são utilizados softwares.

### 3.4 ANÁLISE RAM

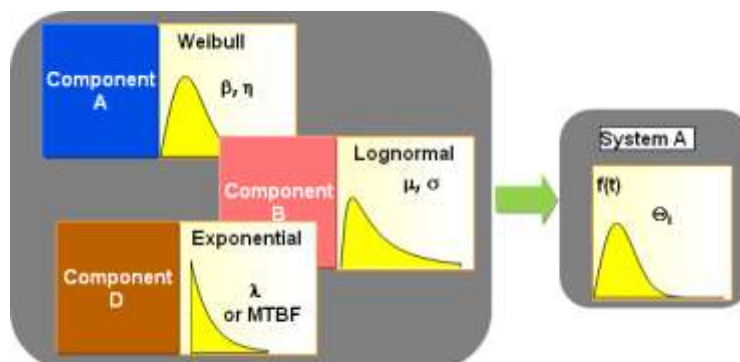
A análise RAM (Reliability, Availability and Maintainability) tem como objetivo avaliar o desempenho de um equipamento ou sistema através da definição e melhoria dos equipamentos críticos, para que o sistema atinja a disponibilidade necessária.

Para realização da análise RAM é necessário o levantamento dos modos de falha dos equipamentos, que causam perda para o sistema estudado, o histórico de falhas e o tempo necessário para reparar cada modo de falha. O segundo passo dessa análise é modelar o sistema segundo a metodologia do Diagrama de blocos, que representa cada equipamento considerado no sistema em série ou em paralelo, dependendo da lógica de perda gerada para o sistema. O terceiro passo é a simulação direta, que descreve o comportamento do sistema ao longo do tempo segundo as características de falha e reparo de cada equipamento, dando o resultado de disponibilidade final do sistema, sendo possível observar a contribuição no percentual de perdas de cada equipamento no sistema.

#### 3.4.1 Modelagem de Sistema

Na análise de confiabilidade do sistema, é construído um modelo do sistema, a partir dos modelos dos componentes. Em outras palavras, preocupa-se com a construção de um modelo (distribuição de vida) que represente os tempos até falha do sistema completo baseado na distribuição de vida dos subsistemas, conjuntos e/ou componentes (“caixas pretas”) que compõem o sistema.

Figura 3.12 – Modelos dos Componentes e Sistemas



Fonte: Weibul, 2017.

Conforme mostrado na figura 3.12, cada componente, a partir dos seus dados de vida, gera uma distribuição que o representa. Ao considerar a associação lógica dos componentes será obtida uma distribuição que representa todo o sistema.

### 3.4.2 Diagramas Analíticos

A abordagem analítica envolve a determinação de uma expressão matemática que descreve a confiabilidade do sistema em termos de confiabilidades dos seus componentes. Diagramas analíticos são apropriados quando se está realizando “análise de confiabilidade”. No contexto do BlockSim, o termo “análise de confiabilidade” é usado para se referir a todas análises que não incluem reparos ou restaurações do componente. Quando se considera somente as características de falha dos componentes, a abordagem analítica pode ser usada. Entretanto, quando ambas características de falha e manutenção necessitam serem consideradas, o método de simulação deve ser utilizado para levar em conta os eventos adicionais.

Figura 3.13 – Seleção de Diagrama RBD Analítico no BlockSim



Fonte: o autor (2017).

Na figura 3.13 é mostrada a seleção realizada no BlockSim com o objetivo de adicionar um RBD Analítico para análise de confiabilidade.

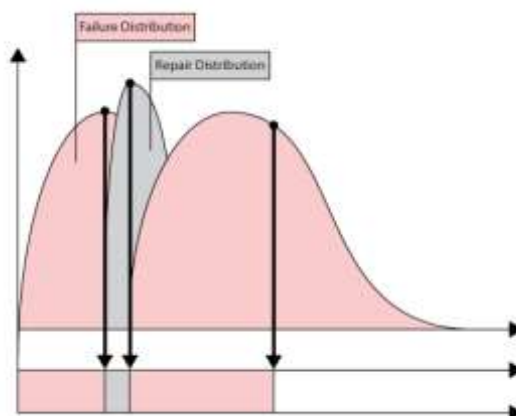
### 3.4.3 Diagramas de Simulação

Em contraste aos diagramas analíticos, os diagramas de simulação levam em conta reparos e ações de restauração, incluindo comportamentos de equipes, sobressalentes, rendimento, etc. Estas ações significam que a idade dos componentes do sistema não é mais uniforme e também o tempo de operação do sistema não é contínuo. Se alguém inclui informação de características de reparo e manutenção dos componentes e recursos disponíveis no sistema, outras informações também podem ser analisadas/obtidas, como a disponibilidade do sistema, rendimento, utilização de sobressalentes, custo do ciclo de vida, etc. Isto pode ser obtido através de simulação de eventos discretos.

Em simulação, tempos de falhas randômicos são gerados de cada distribuição de falha do componente. Esses tempos de falha são então considerados de acordo com o modo que os componentes estão arranjados logicamente dentro do sistema. Os resultados globais são analisados para determinar o comportamento do sistema completo.

Em um caso probabilístico, as falhas e reparos não acontecem em um tempo fixo ou com uma duração fixa, ao contrário, ocorrem randomicamente e baseados na distribuição relacionada, conforme mostrado na figura 3.14.

Figura 3.14 – Visão Probabilística Randômica de Distribuição de Falhas e Reparos



Fonte: Reliawiki, 2017.

A figura 3.14 representa o modelo de simulação que utiliza tempos de falha randômicos da distribuição de falha e da distribuição de reparo para projetar os dados de confiabilidade do sistema.

### 3.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordado o embasamento teórico com a descrição de vários conceitos de confiabilidade quantitativa, como: conceitos fundamentais de confiabilidade, análise de dados de vida, diagrama de blocos de confiabilidade e análise RAM.

O conteúdo abordado neste capítulo é de substancial contribuição para o presente estudo de caso devido apresentar o conhecimento teórico das ferramentas que serão utilizadas no desenvolvimento das etapas seguintes requeridas.

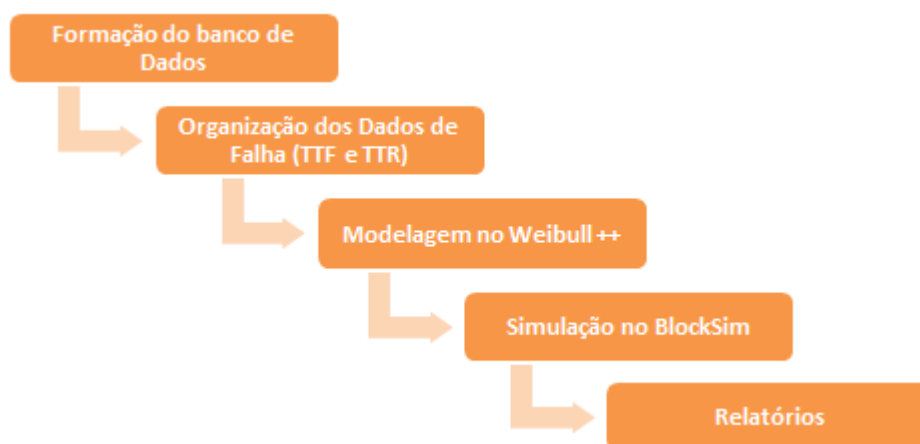
O próximo capítulo tratará do desenvolvimento do estudo de caso, com a aplicação do caso real de uma linha de galvanização contínua de aços planos e para isto os fundamentos teóricos são importantes e devem ser devidamente aplicados, proporcionando a avaliação do desempenho do sistema de modo a melhorar sua performance em disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será abordada a aplicação do referencial teórico do Capítulo 3, ao processo produtivo, objeto de aplicação deste estudo mostrado no Capítulo 2. Será explanado sobre o desenvolvimento considerando os procedimentos para coleta e análise de dados, assim como as considerações e simplificações adotadas. Por fim, serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise realizada.

A metodologia utilizada possui as seguintes etapas principais, conforme mostrado na figura 4.1.

Figura 4.1 – Metodologia de Análise RAM utilizada no estudo de caso.



Fonte: o autor (2017).

Será explanada, portanto, a aplicação do estudo de confiabilidade quantitativa a partir da análise RAM na Linha de Galvanização Contínua.

### 4.1 LEVANTAMENTO E PREPARAÇÃO DOS DADOS

O levantamento de informações foi realizado a partir do banco de dados do sistema de N2, sistema de controle e imputação das paradas, que gera eventos automaticamente quando ocorre uma parada de linha. Estes dados são acordados mensalmente entre as áreas envolvidas, de forma a validar os responsáveis por cada parada. O período de análise deste estudo foi de 18 meses (de janeiro/2016 até junho/17). Como as informações disponíveis não são suficientes foi necessário

verificar cada evento de parada para atribuí-lo ao equipamento causador da parada, sendo consultado, em alguns casos o sistema de registro e análise de falhas da empresa, assim como entrevistas com os envolvidos. Com o intuito de prover um estudo representativo, foram tratadas todas as paradas de operação e de manutenção (elétrica e mecânica) do período, sendo analisados 122 eventos englobando 38 diferentes equipamentos. Não foram consideradas as paradas ocasionadas por defeito de matéria-prima, devido se tratar de um fator externo que não representa a performance desta linha em si. Os dados foram modelados em uma planilha, conforme mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Planilha de modelagem dos dados de falha

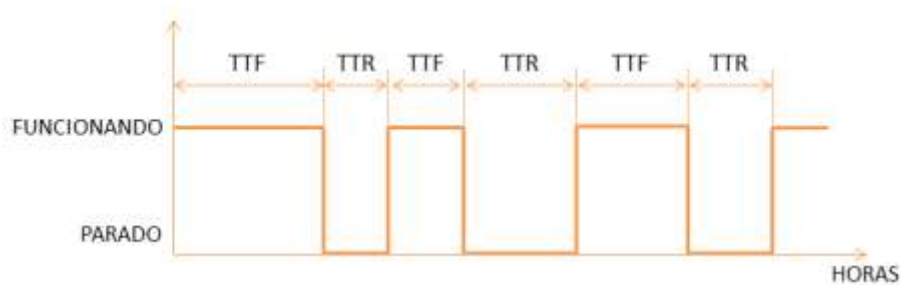
ANO	IDC_EVENTO	DAT_STR	DAT_END	TIM_LOSS	CMT_OPR	EQUIPTO	IMPUTACION N_2	F/S	TTF	TTR	
2016	39068	09/01/2016 11:50	09/01/2016 13:49	1:59:53	# Problema: falha na sequencia	ENROLADEIRA	B15 - Falha Elétrica	S	203,84	1,99	
2016	39188	24/01/2016 17:55	24/01/2016 18:19	0:23:41	# Problema: Mandril não expandido.	ENROLADEIRA	B14 - Falha Mecânica	F	364,09	0,39	
2016	39364	11/02/2016 12:11	11/02/2016 14:07	1:55:32	# Problema: parada de linha devido falha de sim	ENROLADEIRA	B14 - Falha Mecânica	F	425,87	1,93	
2016	39366	11/02/2016 14:07	11/02/2016 16:04	1:57:58	# Problema: Falha no descarregamento da	ENROLADEIRA	B12 - Falha Operacional	F	0,00	1,97	
2016	39384	14/02/2016 12:25	14/02/2016 12:29	0:04:19	Barreira atuada, realizado a retirada da bobina	ENROLADEIRA	B12 - Falha Operacional	F	68,34	0,07	
2016	39410	18/02/2016 13:07	18/02/2016 14:12	1:05:14	# Problema: Perda de expansão do mandril# Caus	ENROLADEIRA	B14 - Falha Mecânica	F	96,63	1,09	
2016	39481	23/02/2016 07:19	23/02/2016 09:40	2:21:20	# Problema:Contaminação do óleo e rompimento	ENROLADEIRA	B14 - Falha Mecânica	F	113,11	2,36	
2016	39464	23/02/2016 19:10	23/02/2016 19:03	9:53:26	# Problema:Contaminação do óleo e rompimento	ENROLADEIRA	B14 - Falha Mecânica	F	3,50	5,89	
2016	40944	13/08/2016 22:18	13/08/2016 22:24	0:06:16	B11.2 - Processo ----	ENROLADEIRA	B12 - Falha Operacional	F	4131,25	0,10	
2017	43203	15/03/2017 05:40	15/03/2017 05:59	00:19:33	# Problema: Parada de linha na seção de saída	ENROLADEIRA	B12 - Falha Operacional	F	5119,25	0,32	
									S	2586,00	
		Data Inicial	01/01/2016 00:00								
		Data Final	30/06/2017 23:59								

Fonte: o autor (2017).

A tabela 4.1 apresenta a planilha de modelagem extraída do sistema de nível 2 que possui, da esquerda para a direita, o ano da ocorrência (ANO), o número do evento (IDC\_EVENTO), a data de início da parada (DAT\_STR), a data de fim da parada (DAT\_END), o tempo da parada (TIM\_LOSS), o comentário imputado pela operação realizado logo após o evento (CMT\_OPR), o equipamento causador da parada (EQUIPTO), a atribuição da parada para elétrica, mecânica ou operação (IMPUTACION N\_2). Há também os dados necessários para a confiabilidade quantitativa, como, a indicação de Falha ou Suspensão (F/S), o tempo até a falha (TTF) e o tempo até o reparo (TTR).

Por se tratar de um sistema reparável, os dados necessários para se levantar as curvas de confiabilidade e manutenibilidade são mostrados na figura 4.2.

Figura 4.2 - Tipos de Dados de Confiabilidade para Sistemas Reparáveis



Fonte: o autor (2017).

A seguir será explanado como foram realizados, para cada evento, os cálculos de confiabilidade e de manutenibilidade necessários para a realização da análise de confiabilidade quantitativa em questão.

#### 4.1.1 Dados de Confiabilidade (TTF)

O TTF (time to fail), conhecido como tempo até a falha, é o valor que representa a confiabilidade do equipamento, pois indica o período em que o sistema esteve em funcionamento desde o fim da falha anterior até o início da falha atual. Este dado foi obtido a partir da planilha de modelagem.

Tabela 4.2 - Cálculo do TTF

ANO	IDC_EVE NT	DATA_STR	DATA_END	TIM_LOS	CMT_OPR	EQUIPTO	IMPUTATION N.º	F/S	TTF(n)	TTR(n)
2016	39068	09/01/2016 11:50	09/01/2016 13:49	1:59:33	# Problema: falha na sequencia	ENROLADEIRA	B15 - Falha Elétrica	S	203,84	1,99
2016	39188	24/01/2016 17:35	24/01/2016 18:19	0:23:41	# Problema: Mandril não expandido.	ENROLADEIRA	B14 - Falha Mecânica	F	364,09	0,39

1      2       $TTF = 1 - 2$

Fonte: o autor (2017).

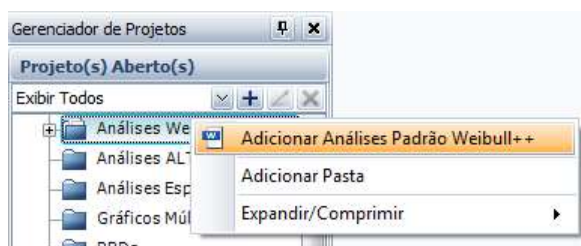
Conforme mostrado na tabela 4.2, para se determinar o tempo que o equipamento esteve em funcionamento (time do fail), realiza-se a subtração do início da parada atual (1) com o fim da parada anterior (2).

Conforme a tabela 4.1, há dois casos especiais, relativo ao TTF da primeira falha e o TTF após a última falha. Trata-se de dois casos de suspensão (S), que são indicados na coluna F/S, onde (F) indica se houve falha e (S) indica uma suspensão. A primeira falha é considerada uma suspensão, devido não se conhecer quando ocorreu o final da falha anterior. Após a última falha também há uma suspensão devido não se saber quando a falha seguinte ocorrerá.





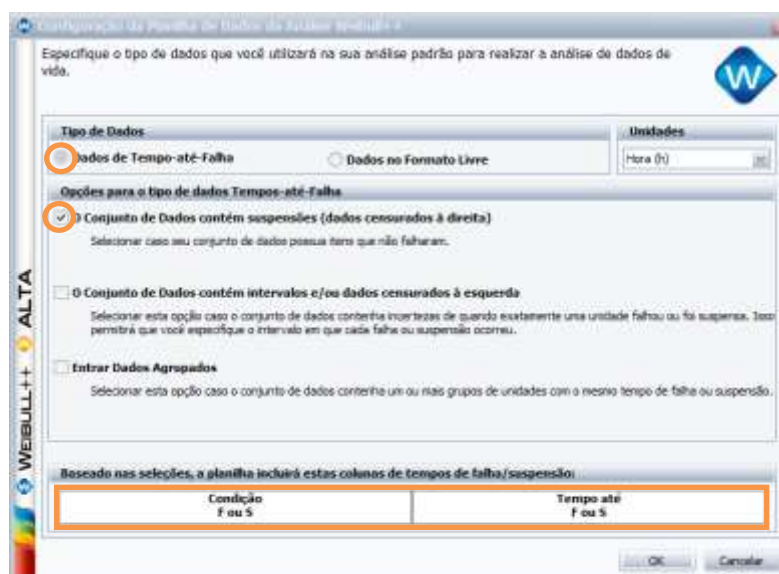
Figura 4.3 - Criação de Análises no Weibull++ da Reliasoft



Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

A criação das planilhas de dados para o cálculo do TTF (dados de confiabilidade) foi realizada com a seleção dos tipos de dados como “Dados de Tempo até a Falha”. Neste caso, como há suspensões, selecionou-se a opção “O Conjunto de Dados contém suspensões”, como pode ser visto na figura 4.4. Deste modo duas colunas serão criadas: Falha/Suspensão e Tempo até a Falha/Suspensão.

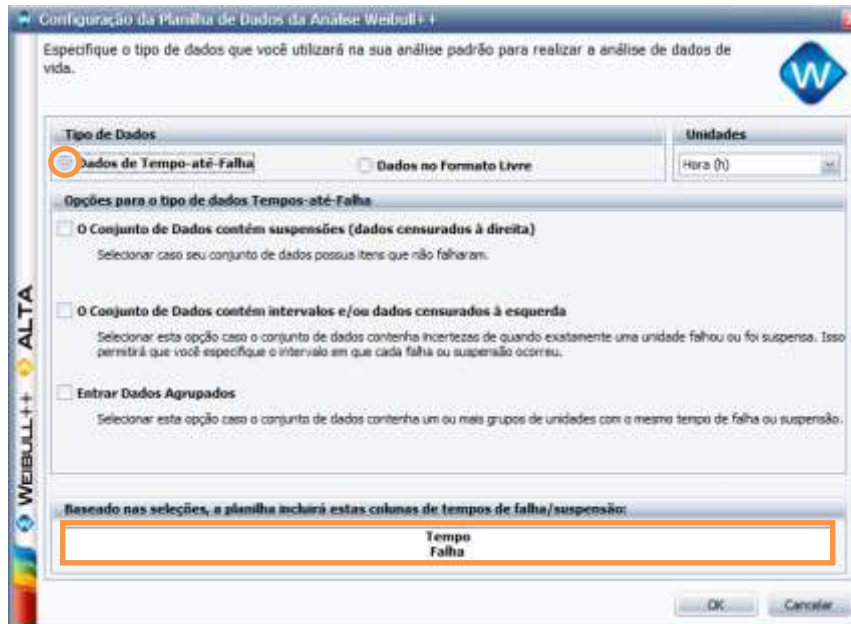
Figura 4.4 - Configuração da planilha de Dados de Confiabilidade (TTF)



Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

Para os dados de mantabilidade (TTR), a planilha de dados foi criada selecionando-se “Dados de Tempo até a Falha” e como não há suspensões, nenhuma seleção de opções para o tipo de dados. Como visto na figura 4.5, será criada somente uma coluna para a imputação de dados, chamada de “Tempo Falha”.

Figura 4.5 - Configuração da planilha de Dados de Manutenibilidade (TTR)

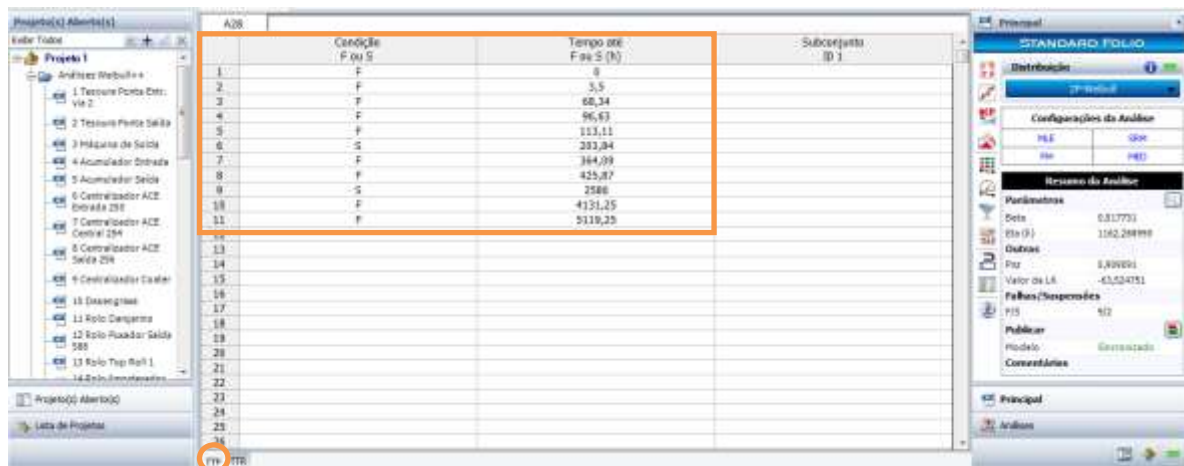


Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

O lançamento dos dados foi feito a partir da planilha de modelagem dos dados, mostrada no capítulo 4.1.

Os dados de confiabilidade foram colocados na aba nomeada como TTF, conforme figura 4.6.

Figura 4.6 - Carregamento dos dados de confiabilidade (TTF) no Weibull++



Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

Os dados de manutenibilidade (TTR) foram lançados na aba TTR, conforme figura 4.7 para todos os equipamentos em estudo.

Figura 4.7 - Carregamento dos dados de manutenibilidade (TTF) no Weibull++

Tempo	Falhas (h)
1	0,07
2	0,1
3	0,32
4	0,39
5	1,08
6	1,93
7	1,37
8	1,56
9	3,26
10	5,48

Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

Após a imputação dos dados é realizada a definição do modelo estatístico que representa melhor a distribuição dos dados reais. Para tal, é realizado o “Teste de Aderência” usando o assistente de distribuição que apresenta as distribuições com um ranqueamento para auxiliar na escolha do modelo, conforme mostrado na figura 4.8.

Figura 4.8 - Assistente de distribuição do Weibull++

Distribuição	Ranqueamento
<input checked="" type="checkbox"/> Exponencial-1P	7
<input checked="" type="checkbox"/> Exponencial-2P	7
<input checked="" type="checkbox"/> Normal	9
<input checked="" type="checkbox"/> Lognormal	1
<input checked="" type="checkbox"/> Weibull-2P	5
<input checked="" type="checkbox"/> Weibull-3P	3
<input checked="" type="checkbox"/> Gama	6
<input checked="" type="checkbox"/> Gama-G	2
<input checked="" type="checkbox"/> Logística	8
<input checked="" type="checkbox"/> Loglogística	4
<input checked="" type="checkbox"/> Gumbel	10

Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

Este modelo definido deve, então, ser publicado, para poder ser utilizado no BlockSim, como será explicado posteriormente. Esta publicação é realizada ao pressionar o botão “Publicar”, conforme mostrado na figura 4.9.

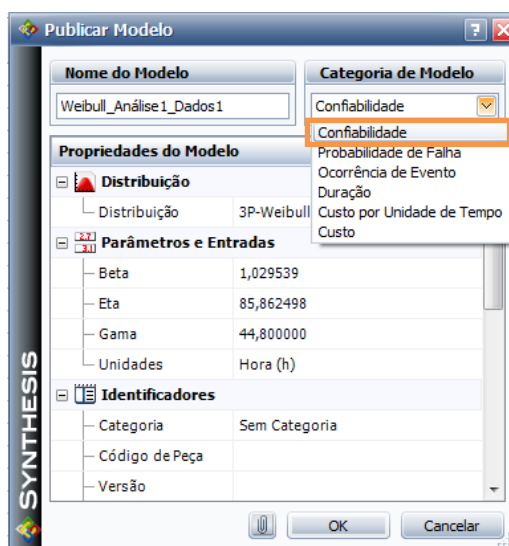
Figura 4.9 – Ativação da função publicar modelo no Weibull++



Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

Para realizar a publicação do modelo, a Categoria de Modelo deverá ser marcada como “Confiabilidade”, quando se tratar dos dados de confiabilidade (TTF), conforme figura 4.10.

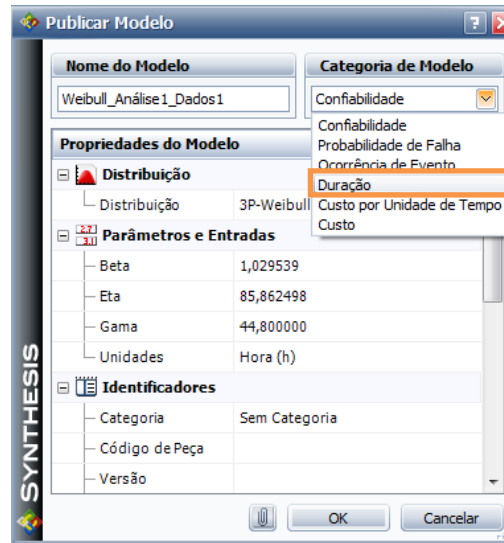
Figura 4.10 – Categoria de Modelo para Dados de Confiabilidade (TTF)



Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

No caso dos dados de Manutenibilidade (TTR), a classificação correta para a publicação do modelo é “Duração”, pois trata-se dos tempos de reparo das paradas, o que é mostrado na figura 4.11

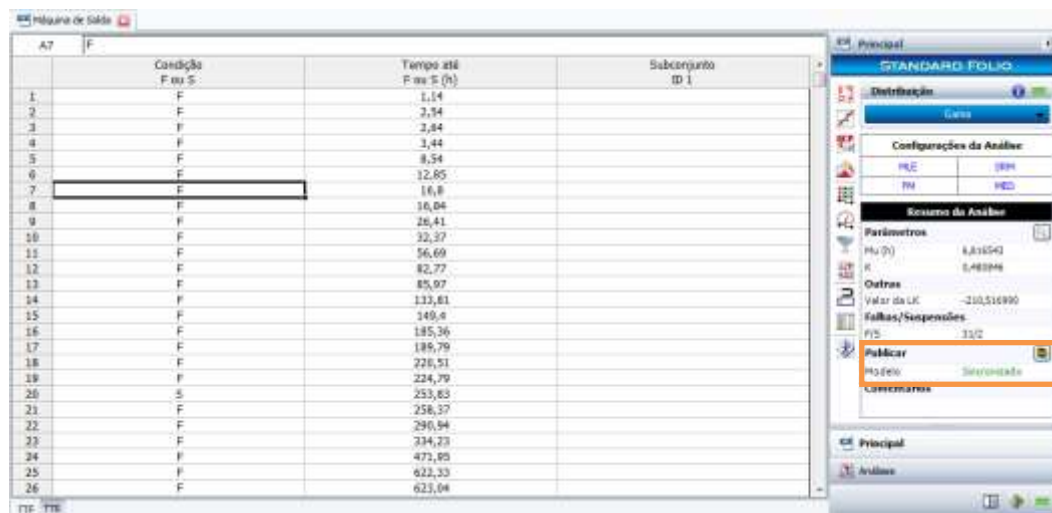
Figura 4.11 – Categoria de Modelo para Dados de Manutenibilidade (TTR)



Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

A efetiva publicação do modelo é observada por meio de uma sinalização mostrada na figura 4.12, onde aparece “Modelo Sincronizado”. Com isto será possível localizar este modelo no BlockSim.

Figura 4.12 – Indicação de Modelo Sincronizado no Weibull++

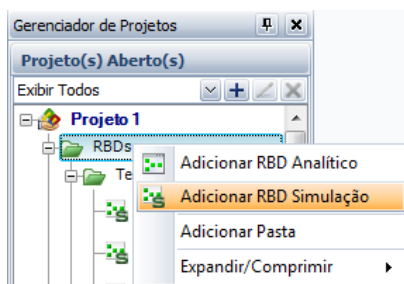


Fonte: Software Weibull Reliasoft (2017).

Com o modelo definido e publicado, foi realizada a validação do mesmo, através da comparação com os dados reais de falhas do banco de dados. Tal comparação é obtida através da simulação deste modelo no software BlockSim da ReliaSoft.

No BlockSim, adiciona-se um RBD Simulação, conforme figura 4.13 para possibilitar a criação do bloco de um equipamento.

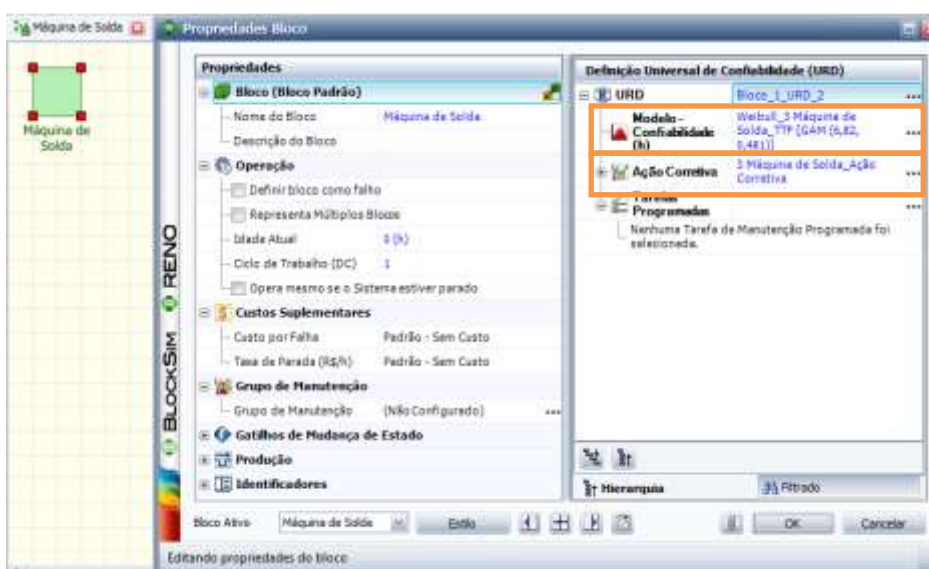
Figura 4.13 – Criação de um RBD para Simulação no BlockSim



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Realiza-se a adição de um novo bloco e ao entrar em propriedades do bloco, é possível renomeá-lo e adicionar os modelos publicados anteriormente, sendo que o modelo dos dados de Confiabilidade (TTF) é inserido em “Modelo – Confiabilidade (h)”. No caso dos dados de Manutenibilidade (TTR) deve ser inserido o respectivo modelo em “Ação Corretiva”, o que pode ser visualizado na figura 4.14.

Figura 4.14 – Configuração do BlockSim para validação dos modelos criados no Weibull++



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).



Foi realizada a simulação, de um único equipamento, utilizando-se o mesmo período aplicado neste estudo de caso (18 meses), sendo obtido o resultado apresentado na figura 4.15.

Figura 4.15 - Validação do modelo utilizado no BlockSim

BLOCKSIM - SIMULAÇÃO		BANCO DE DADOS		
15	Tempo Disponível/Indisponível do Sistema			
16	Tempo Disponível (h):	13054,2081		
17	Tempo Indisponível da MC (h):	85,79190421		
18	Tempo Indisponível da Inspeção (h):	0		
19	Tempo Indisponível MP (h):	0		
20	Tempo Indisponível da OC (h):	0		
21	Downtime de Espera (h):	0		
22	Tempo Indisponível Total (h):	85,79190421		
23	Eventos com Parada do Sistema			
24	Número de Falhas:	31,006		

EQUIPAMENTO	NÚMERO DE FALHAS	TEMPO INDISP. (H)
MÁQUINA DE SOLDA	32	86,93

Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Evidencia-se neste caso, que o modelo escolhido se encontra bem ajustado com a realidade, ao gerar um resultado bem próximo do número de falhas e o tempo indisponível entre o BlockSim e o Banco de Dados.

Deve-se observar, porém, que nos casos de diferenças nesta comparação, foi necessário realizar a escolha de outros modelos novamente no Weibull++ e proceder nova simulação no BlockSim até que se encontrasse resultado satisfatório.

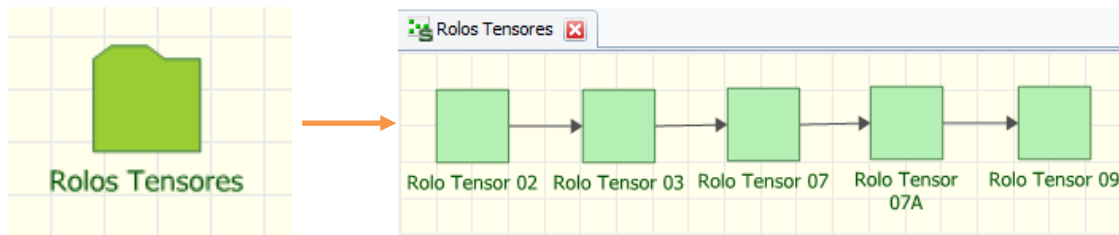
#### 4.3 CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO PRODUTIVO NO BLOCKSIM

Com os modelos devidamente validados, foi construído o diagrama de blocos na configuração em série, pois, a linha de galvanização é um processo contínuo onde a falha em qualquer equipamento provoca a falha de todo o fluxo produtivo, gerando uma parada de linha.

Foi adicionado, um RBD para Simulação, conforme figura 4.12, sendo inseridos os 38 equipamentos com a utilização de alguns Subdiagramas. A figura 4.16 exemplifica o Subdiagrama “Rolos Tensores”, onde foram agrupados, por similaridade, cinco equipamentos que estão instalados em diferentes partes do processo fabril.



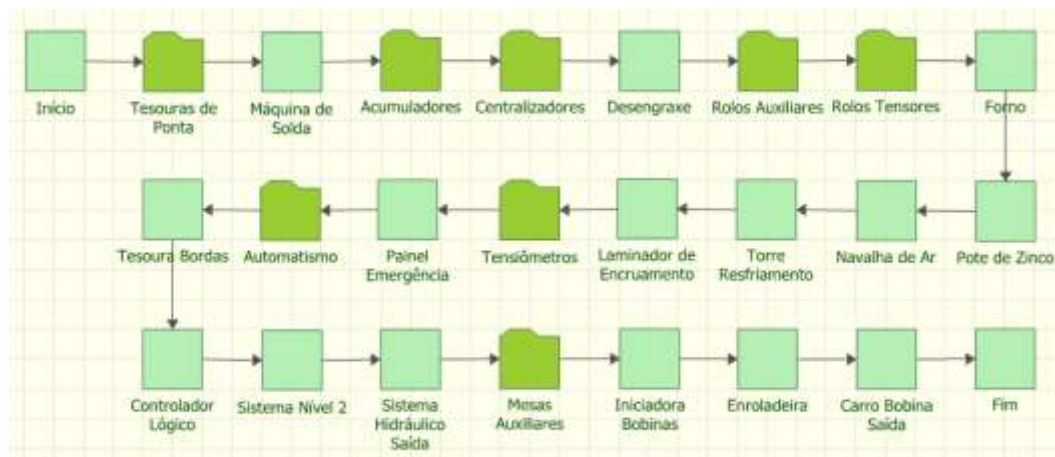
Figura 4.16 – Subdiagramas utilizados no BlockSim



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Na figura 4.17 é apresentado o diagrama de blocos geral da Linha de Galvanização, o qual irá permitir a análise de confiabilidade quantitativa do processo fabril, objeto de estudo.

Figura 4.17 - Diagrama de Blocos RBD da Linha de Galvanização no BlockSim



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

A partir do modelamento realizado no RBD, foi realizada a simulação, para o período de observação no estudo, 18 meses (13140horas), sendo obtido o resultado geral do sistema.

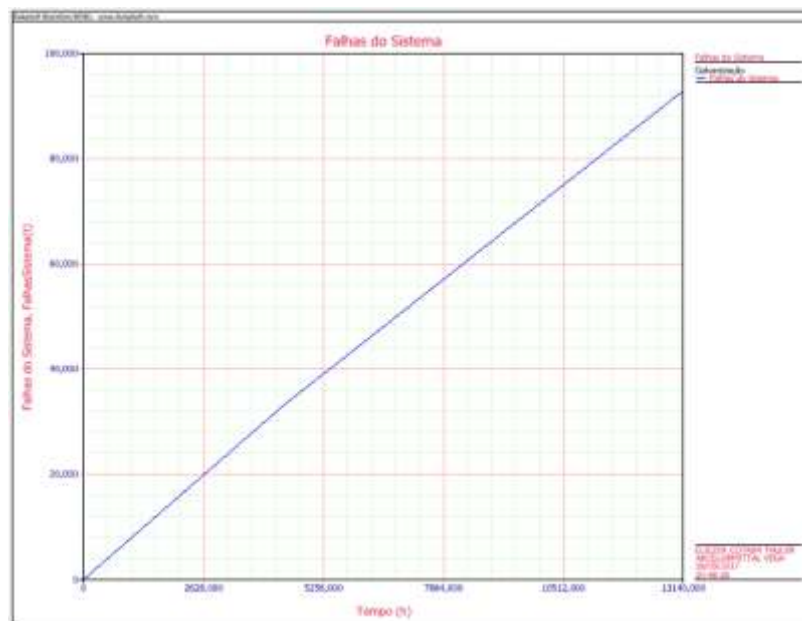
Figura 4.18 - Resultado da Simulação do RDB no BlockSim

Visão Geral do Sistema	
<b>Geral</b>	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	0,98550612
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	0,00399015
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	0,98550612
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 13140:	0,986
Confiabilidade(13140):	0
Quantidade Esperada de Falhas:	93,034
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	11,92161772
TMAPF (h):	33,17006877
MTBF (Tempo Total) (h):	141,2386869
MTBF (Tempo de Funcionamento) (h):	139,1915905
MTBE (Tempo Total) (h):	141,8133546
MTBE (Tempo de Funcionamento) (h):	139,757929
<b>Tempo Disponível/Indisponível do Sistema</b>	
Tempo Disponível (h):	12949,55043
Tempo Indisponível da MC (h):	190,4495717
Tempo Indisponível da Inspeção (h):	0
Tempo Indisponível MP (h):	0
Tempo Indisponível da OC (h):	0
Downtime de Espera (h):	0
Tempo Indisponível Total (h):	190,4495717
<b>Eventos com Parada do Sistema</b>	
Número de Falhas:	92,657
Quantidade de MCs:	92,657

Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Conforme figura 4.18, pode se verificar que o sistema possui uma disponibilidade de 98,55%, com 92,6 eventos de falhas e 190 horas de tempo indisponível, além de outras informações disponíveis, como MTBF, TMAPF, tempo disponível, etc.

Figura 4.19 – Curva de falhas do sistema.



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

A figura 4.19 apresenta a evolução esperada de falhas ao longo do tempo no sistema de acordo com a simulação realizada, totalizando no final de 13140 horas o número de 92 falhas.

Este processo possui uma característica, que é a geração de sucata de material galvanizado na saída do processo produtivo, que sempre ocorre quando há parada de linha.

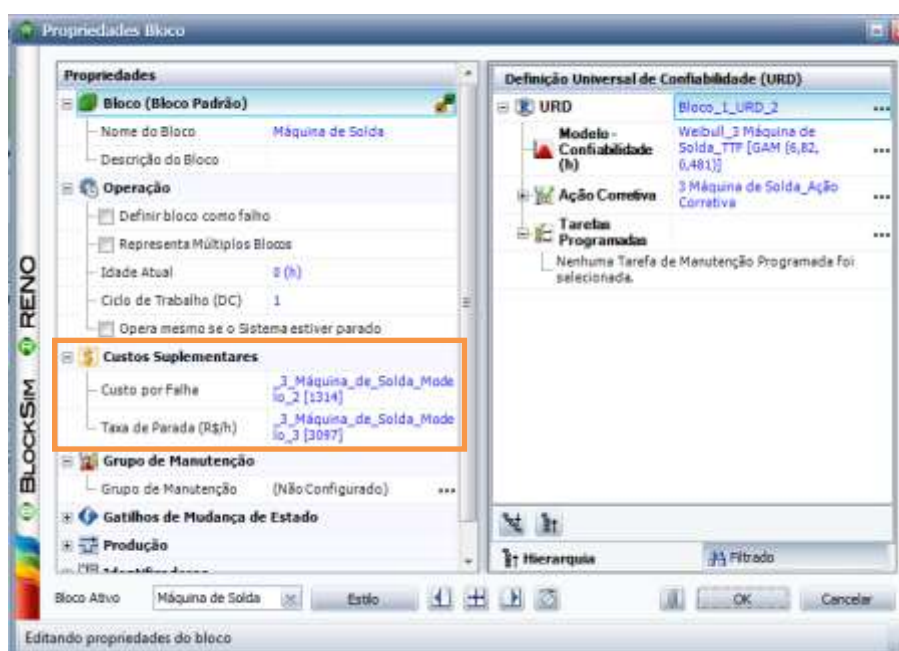
Com a finalidade de quantificar esta perda, foi levantado e apontado o Custo por Falha – custo com a perda na geração de sucata que ocorre por cada parada de linha.

A perda relativa ao custo do tempo de parada de produção foi contabilizada como Taxa de parada (R\$/h) – custo relativo à perda de margem de contribuição por hora parada.

Nota: Os valores imputados são fictícios, porém foram preservadas a relação entre eles, de forma a poder explicitar a proporção do impacto de cada custo.

Estes custos foram considerados para os 38 equipamentos envolvidos, devido todos apresentarem a mesma perda. Embora haja equipamentos mais simples e mais complexos, ressalta-se que o impacto gerado de custo por cada um possui proporções semelhantes no caso de parada de linha.

Figura 4.20 – Inserção de custos suplementares no BlockSim



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Estes custos foram inseridos como “Custos Suplementares”, nos campos de “Custo por falha” e “Taxa de Parada(R\$/h)”, conforme se observa na figura 4.20.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS MAIS IMPACTANTES NO PROCESSO PRODUTIVO

A verificação dos equipamentos que mais influenciam na performance deste processo produtivo será realizada através dos resultados da simulação realizada, considerando-se os seguintes critérios e índices de avaliação:

- Índice de Criticidade RS FCI;
- Índice de Criticidade RS DTCl;
- Tempo indisponível e eventos de parada;
- Custo das perdas geradas nos eventos de parada.

##### 4.4.1 Índice de Criticidade da Reliasoft (RS FCI)

O índice ReliaSoft FCI (Failure Criticality Index) é uma medida relativa referente ao número de falhas do sistema causada pelo componente em análise, ou seja, a porcentagem de vezes em que a falha do componente causou falha no sistema. Sendo assim, trata-se de uma indicação dos equipamentos que estão impactando mais na confiabilidade da linha.

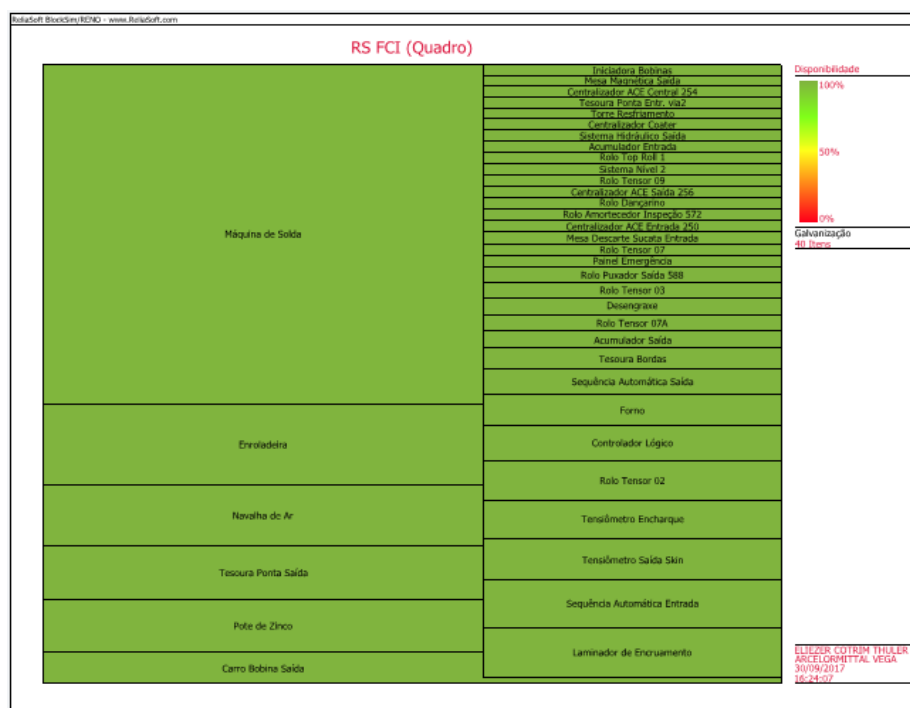
Tabela 4.4 – Índice de criticidade RS FCI por equipamento

Ranqueamento da Criticidade de Falha do Bloco	
Nome do Bloco (Diagrama)	RS FCI
Máquina de Solda(Galvanização)	32,68%
Enroladeira(Galvanização)	7,86%
Navalha de Ar(Galvanização)	5,84%
Tesoura Ponta Saída(Tesouras de Ponta)	5,15%
Pote de Zinco(Galvanização)	5,14%
Carro Bobina Saída(Galvanização)	3,46%
Laminador de Encruamento(Galvanização)	3,23%
Sequência Automática Entrada(Automatismo)	3,07%
Tensiômetro Saída Skin(Tensiômetros)	2,69%
Tensiômetro Encharque(Tensiômetros)	2,55%
Rolo Tensor 02(Rolos Tensores)	2,54%
Controlador Lógico(Galvanização)	2,28%
Forno(Galvanização)	2,01%
Sequência Automática Saída(Automatismo)	1,67%
Tesoura Bordas(Galvanização)	1,37%
Acumulador Saída(Acumuladores)	1,10%
Rolo Tensor 07A(Rolos Tensores)	1,09%
Desengraxe(Galvanização)	1,08%
Rolo Tensor 03(Rolos Tensores)	1,04%

Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Na tabela 4.4, observa-se alguns equipamentos com impacto relevante em relação ao número de falhas ocorridas no processo produtivo.

Figura 4.21 – Quadro RS FCI com indicação da criticidade RS FCI por número de falhas



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

O quadro RS FCI, mostrado na figura 4.21 apresenta uma visão geral, apresentando todos equipamentos e o seu impacto na criticidade do número de falhas.

#### 4.4.2 Índice de Criticidade da Reliasoft (RS DTCI)

Este índice, o ReliaSoft DTCI (Downtime Criticality Index) apresenta uma relação referente ao tempo de indisponibilidade do sistema causado por um componente em relação ao tempo de indisponibilidade total do sistema. Trata-se de um índice relativo à manutenibilidade, devido retratar o comportamento do tempo de reparo das falhas ocorridas.

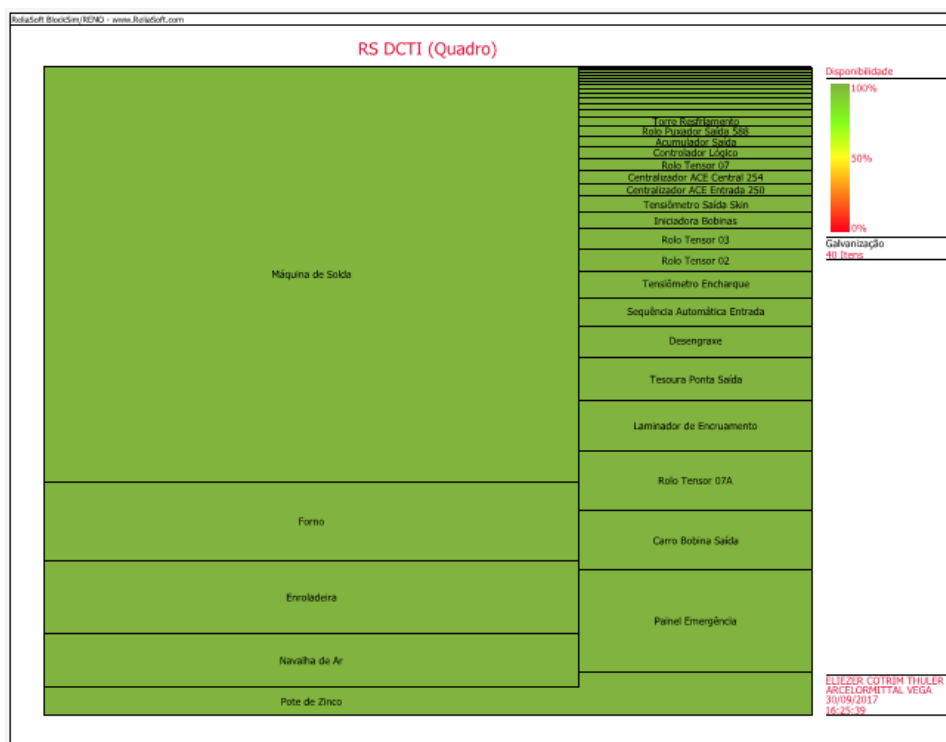
Tabela 4.5 – Índice de criticidade RS DTCI por equipamento

<b>Ranqueamento do Tempo de Parada por Criticidade do Bloco</b>	
<b>Nome do Bloco (Diagrama)</b>	<b>RS DTCI</b>
Máquina de Solda(Galvanização)	44,63%
Forno(Galvanização)	8,43%
Enroladeira(Galvanização)	7,86%
Navalha de Ar(Galvanização)	5,75%
Pote de Zinco(Galvanização)	5,09%
Painel Emergência(Galvanização)	4,78%
Carro Bobina Saída(Galvanização)	2,80%
Rolo Tensor 07A(Rolos Tensores)	2,77%
Laminador de Encruamento(Galvanização)	2,32%
Tesoura Ponta Saída(Tesouras de Ponta)	2,05%
Desengraxa(Galvanização)	1,43%
Sequência Automática Entrada(Automatismo)	1,33%
Tensiômetro Encharque(Tensiômetros)	1,25%
Rolo Tensor 02(Rolos Tensores)	0,97%
Rolo Tensor 03(Rolos Tensores)	0,97%
Iniciadora Bobinas(Galvanização)	0,79%
Tensiômetro Saída Skin(Tensiômetros)	0,74%

Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Observa-se, na tabela 4.5, a proporção do impacto de alguns equipamentos nos tempos de parada de linha.

Figura 4.22 – Quadro RS DCTI com indicação da criticidade RS DCTI por tempo de indisponibilidade



Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

O quadro RS DTCTI da figura 4.22 indica de uma forma geral quais equipamentos impactam mais na indisponibilidade da linha de produção.

#### 4.4.3 Tempo Indisponível do Bloco e Número de Paradas do Sistema

Este critério apresenta o ranqueamento dos valores absolutos de tempo indisponível do bloco em horas e dos números de eventos de parada do sistema, de modo a possibilitar a visualização do impacto real causado no resultado do sistema. Trata-se da análise da manutenibilidade e confiabilidade dos equipamentos mais impactantes.

Tabela 4.6 – Tempo Indisponível do Bloco e Números de Paradas do Sistema

Ranqueamento do Tempo Indisponível do Bloco		Ranqueamento das Falhas do Bloco	
Nome do Bloco (Diagrama)	Tempo Indisponível do Bloco (h)	Nome do Bloco (Diagrama)	# Esperado Falhas
Máquina de Solda(Galvanização)	85,00668041	Máquina de Solda(Galvanização)	30,403
Forno(Galvanização)	16,0590815	Enroladeira(Galvanização)	8,042
Enroladeira(Galvanização)	14,97136669	Navalha de Ar(Galvanização)	5,429
Navalha de Ar(Galvanização)	10,95733708	Tesoura Ponta Saída(Tesouras de Ponta)	4,795
Pote de Zinco(Galvanização)	9,70301907	Pote de Zinco(Galvanização)	4,778
Painel Emergência(Galvanização)	9,09492383	Carro Bobina Saída(Galvanização)	3,223
Carro Bobina Saída(Galvanização)	5,34160046	Laminador de Encruamento(Galvanização)	3,007
Rolo Tensor 07A(Rolos Tensores)	5,27773195	Sequência Automática Entrada(Automatismo)	2,86
Laminador de Encruamento(Galvanização)	4,41625885	Tensiômetro Saída Skin(Tensiômetros)	2,501
Tesoura Ponta Saída(Tesouras de Ponta)	3,90305202	Tensiômetro Encharque(Tensiômetros)	2,368
Desengraxe(Galvanização)	2,72355139	Rolo Tensor 02(Rolos Tensores)	2,366
Sequência Automática Entrada(Automatismo)	2,53643982	Controlador Lógico(Galvanização)	2,124
Tensiômetro Encharque(Tensiômetros)	2,38385442	Forno(Galvanização)	1,873
Rolo Tensor 02(Rolos Tensores)	1,85155766	Sequência Automática Saída(Automatismo)	1,553
Rolo Tensor 03(Rolos Tensores)	1,84937405	Tesoura Bordas(Galvanização)	1,321
Iniciadora Bobinas(Galvanização)	1,50115593	Rolo Tensor 07A(Rolos Tensores)	1,102
Tensiômetro Saída Skin(Tensiômetros)	1,40143239	Acumulador Saída(Acumuladores)	1,027

Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

Os valores absolutos, mostrados na tabela 4.6, demonstram uma dimensão real dos impactos gerados por cada equipamento na performance da linha.

#### 4.4.4 Custo das perdas geradas pelos equipamentos

Outra forma para identificar os equipamentos mais impactantes é uma análise do custo ou perda gerada pelos eventos de parada de linha. Como explanado no capítulo 4.3, a partir da informação de custo inserida no diagrama RBD do BlockSim (custo por falha e taxa de parada), será possível verificar a perda total por bloco e a proporção destas duas parcelas, evidenciando assim, o nível de relevância de cada um destes custos para o negócio.



Tabela 4.7 – Custo das paradas de linha por equipamento

Resumo dos Custos do Bloco			
Nome do Bloco (Diagrama)	Custo Total	Falha do Bloco	Tempo Indisponível do Bloco
Máquina de Solda (Galvanização)	R\$ 303.198,23	R\$ 39.949,54	R\$ 263.248,69
Enroladeira (Galvanização)	R\$ 56.930,52	R\$ 10.567,19	R\$ 46.363,33
Forno (Galvanização)	R\$ 52.192,89	R\$ 2.461,12	R\$ 49.731,76
Navalha de Ar (Galvanização)	R\$ 41.066,39	R\$ 7.133,71	R\$ 33.932,68
Pote de Zinco (Galvanização)	R\$ 36.326,60	R\$ 6.278,29	R\$ 30.048,31
Painel Emergência (Galvanização)	R\$ 29.107,30	R\$ 942,14	R\$ 28.165,16
Carro Bobina Saída (Galvanização)	R\$ 20.776,89	R\$ 4.235,02	R\$ 16.541,87
Tesoura Ponta Saída (Tesouras de Ponta)	R\$ 18.387,60	R\$ 6.300,63	R\$ 12.086,97
Rolo Tensor 07A (Rolos Tensores)	R\$ 17.792,11	R\$ 1.448,03	R\$ 16.344,08
Laminador de Encruamento (Galvanização)	R\$ 17.627,47	R\$ 3.951,20	R\$ 13.676,27
Sequência Automática Entrada (Automatismo)	R\$ 11.612,89	R\$ 3.758,04	R\$ 7.854,85
Tensiômetro Encharque (Tensiômetros)	R\$ 10.493,87	R\$ 3.111,55	R\$ 7.382,32
Desengraxe (Galvanização)	R\$ 9.757,49	R\$ 1.323,20	R\$ 8.434,29
Rolo Tensor 02 (Rolos Tensores)	R\$ 8.842,83	R\$ 3.108,92	R\$ 5.733,90
Tensiômetro Saída Skin (Tensiômetros)	R\$ 7.626,27	R\$ 3.286,31	R\$ 4.339,96
Rolo Tensor 03 (Rolos Tensores)	R\$ 7.001,72	R\$ 1.274,58	R\$ 5.727,14
Controlador Lógico (Galvanização)	R\$ 6.039,61	R\$ 2.790,94	R\$ 3.248,68
Iniciadora Bobinas (Galvanização)	R\$ 5.496,31	R\$ 847,53	R\$ 4.648,78

Fonte: Software BlockSim Reliasoft (2017).

A tabela 4.7 apresenta o resumo dos custos por bloco, contendo os equipamentos em ordem decrescente de custo total. A coluna “Falha do Bloco” indica o custo devido à geração de sucata e a coluna “Tempo Indisponível do Bloco” indica a perda da taxa de parada (R\$/h) relativa à margem de contribuição.

Observa-se, portanto que o impacto do “Tempo Indisponível do Bloco” é bem superior à “Falha do Bloco”, ou seja, a perda gerada em virtude do reparo demonstra a importância da manutenibilidade nestes casos.

#### 4.4.5 Equipamentos mais Impactantes no Processo Produtivo

Através da aplicação da análise RAM e considerando-se os diferentes critérios de priorização, são indicados abaixo os equipamentos com maior impacto no processo produtivo da linha de galvanização:

- Máquina de Solda
- Enroladeira
- Forno
- Navalha de Ar
- Pote de Zinco

É importante observar que os equipamentos listados acima são os que possuem maior impacto em quase todos os critérios observados, evidenciando que estes realmente influenciam na confiabilidade, manutenibilidade e na perda através do custo gerado.

#### 4.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordado o desenvolvimento do estudo de caso em questão, sendo explanadas e detalhadas as etapas de levantamento e preparação dos dados, determinação dos modelos estatísticos e teste de aderência, construção do diagrama de blocos no BlockSim e a determinação dos equipamentos mais impactantes no processo produtivo, compondo assim a análise RAM da Linha de Galvanização.

Este desenvolvimento é muito importante para o presente estudo de caso, pois apresenta o resultado da análise RAM aplicada ao processo produtivo, materializando assim a aplicação da teoria no caso prático com geração de dados que permitem a elaboração da conclusão do objeto de pesquisa analisado.

O próximo capítulo apresentará a síntese dos resultados deste trabalho, que será formulada com base no conteúdo abordado no presente capítulo e apontará comentários conclusivos sobre vários aspectos observados durante a realização do estudo e elaboração desta análise RAM.

## 5 CONCLUSÃO

Foi constatado que a metodologia aplicada é eficaz e coerente com os dados quantitativos utilizados, como foi demonstrado no desenvolvimento do trabalho.

A aplicação da análise RAM no processo produtivo da Galvanização proporcionou, através dos resultados de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, a determinação dos cinco ativos mais críticos que têm impactado negativamente a performance deste processo, considerando-se a influência da manutenção e operação. Conforme mostrado no desenvolvimento do trabalho, o equipamento mais impactante é a Máquina de Solda, que merece um enfoque devido ter tido a pior performance em todos os critérios de priorização analisados.

Os equipamentos com impacto relevante na disponibilidade geral do processo produtivo deverão ser tratados de forma diferenciada, e os seguintes fatores devem ser considerados:

- direcionamento nas análises de falhas;
- direcionamento de recursos (mão de obra, equipamentos de diagnóstico, etc);
- priorização de investimentos de melhoria ou obsolescência;
- aplicação de ferramentas específicas de confiabilidade qualitativa e/ou quantitativa;
- investimento na capacitação do pessoal para minimizar os tempos de diagnóstico e tempos de reparo, tendo em vista a perda financeira evidenciada pelo impacto da manutenibilidade.

Esforços devem ser tomados para evitar desperdícios de recursos de mão de obra e recursos financeiros em equipamentos que não apresentam grande importância na disponibilidade.

A aplicação desta metodologia em outros equipamentos ou processos requer o devido registro dos dados, um software específico e a disponibilidade de recursos com conhecimento de ferramentas avançadas de confiabilidade.

## 5.1 DIFICULDADE ENCONTRADA

A etapa da análise RAM que apresentou maior dificuldade para sua realização foi o levantamento e preparação dos dados.

Apesar de existir um banco de dados disponível para consulta e utilização, foram encontradas muitas dificuldades no levantamento de informações e na preparação dos dados de falha a serem utilizados nas ferramentas de confiabilidade quantitativa. Em alguns casos, observou-se dificuldade no entendimento real da parada de linha gerando dúvidas na atribuição desta falha ao equipamento causador e na imputação do responsável pelo evento (elétrica, mecânica ou operação). Esta etapa demandou um esforço adicional, sendo necessário realizar consultas a outro sistema, o sistema de registro e análise de falhas, para obter maiores detalhes. Foram realizadas também entrevistas às pessoas envolvidas, com o objetivo de prover dados coerentes com a realidade e de não haver inconsistências que pudessem prejudicar a assertividade dos resultados da análise realizada.

Tal dificuldade reflete, em muitos casos, a falta da devida atenção no momento do preenchimento dos registros, a falta de cobrança e a baixa conscientização dos responsáveis pela geração das informações.

Percebe-se, portanto, que os sistemas utilizados atualmente não estão devidamente formatados e preparados para proporcionar levantamentos de dados de confiabilidade de maneira ágil e estruturada para futuros estudos de confiabilidade quantitativa.

Esta dificuldade nos trouxe uma clara visão da importância que deve ser dada em relação à qualidade, consistência e assertividade destas informações inseridas no banco de dados e o seu impacto em estudos futuros.

## 5.2 BENEFÍCIOS PARA A EMPRESA

A aplicação desta metodologia neste processo produtivo gerou oportunidades e os seguintes benefícios para a empresa:

- excelente oportunidade de aprendizado na utilização desta ferramenta de engenharia de confiabilidade;

- percepção das reais dificuldades enfrentadas na elaboração de um estudo de confiabilidade quantitativa;
- grande potencial para ser aplicada a outros equipamentos e processos;
- melhor capacidade de análise do processo produtivo;
- fácil identificação das maiores perdas, através de diferentes critérios, direcionando as ações para serem mais assertivas.

Tais benefícios demonstram o grande potencial futuro que a engenharia de confiabilidade pode proporcionar para os ativos da empresa.

### 5.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A aplicação deste estudo de caso possibilitou a identificação de novas etapas que irão permitir a continuidade deste trabalho de modo a proporcionar melhores resultados de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, que são mostradas a seguir:

- Aplicação da metodologia RCM nos cinco ativos críticos, analisando os modos de falha que se manifestam nestes equipamentos, verificando se os mesmos já estão mapeados ou não, de modo a garantir planos estruturados de manutenção;
- Aplicação de análise das Causas Raízes das Falhas RCA (*Root Cause Analysis*) no equipamento mais crítico (Máquina de Solda), de modo a investigar os mecanismos das falhas e definir ações corretivas/mitigadoras;
- Aplicação da metodologia de análise RAM na linha de Galvanização novamente no futuro de modo a comparar o antes e o depois evidenciando os ganhos tangíveis e intangíveis da aplicação da engenharia de confiabilidade;
- Aplicação da metodologia de análise RAM em outros processos produtivos;
- Estruturação dos dados de confiabilidade com informações consistentes e devidamente preparadas para serem usadas na aplicação de confiabilidade qualitativa e quantitativa;

- Capacitação de mais pessoas em Engenharia da Confiabilidade, com o objetivo de tornar a confiabilidade quantitativa e qualitativa bem difundida e utilizada na empresa como um todo;
- Tratativas com métodos específicos, no caso de falhas repetitivas.

Estas sugestões de novos trabalhos apontam para um novo patamar de conhecimento e utilização de ferramentas avançadas de confiabilidade, que com certeza, irão alavancar melhores resultados de modo a extrair-se o maior valor dos ativos, proporcionando o resultado esperado dos ativos instalados no parque fabril e garantindo a continuidade operacional do negócio.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR-5462 Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia**. ABNT/CB-03 – Eletricidade, 1994.

CALIXTO, Eduardo. **Análise RAM+L: Um Estudo Integrado de Várias Unidades de Produção de uma Refinaria**. Disponível em [www.abraman.org.br/arquivos/121/121.pdf](http://www.abraman.org.br/arquivos/121/121.pdf) (UFRJ-COPPE-PPE).

MAZZEI, Denis: Análise do Custo do Ciclo de Vida. **LCCA (Material Didático)**. Curitiba, PR. 2017. Não Paginado

RELIAWIKI.ORG.**Basics of System Reliability Analysis**. Disponível em: [http://www.reliawiki.org/index.php/Basics\\_of\\_System\\_Reliability\\_Analysis](http://www.reliawiki.org/index.php/Basics_of_System_Reliability_Analysis). Acesso em: 20/07/2017.

RELIAWIKI.ORG.**Introduction to Life Data Analysis**. Disponível em: [http://www.reliawiki.org/index.php/Introduction\\_to\\_Life\\_Data\\_Analysis](http://www.reliawiki.org/index.php/Introduction_to_Life_Data_Analysis). Acesso em: 18/07/2017.

VEGA, ARCELORMITTAL - Disponível em: <http://vega.arcelormittal.com>. Acesso em 30/09/2017.

WEIBULL.COM.**Life Data Analysis (Weibull Analysis)**. Disponível em: <http://www.weibull.com/basics/lifedata.htm>. Acesso em: 18/07/2017

WEIBULL.COM.**Reliability Glossary**.

Disponível em: [http://www.weibull.com/knowledge/rel\\_glossary.htm#R](http://www.weibull.com/knowledge/rel_glossary.htm#R). Acesso em: 19/07/2017.