

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

**SEVERINO ALBANI JUNIOR**

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E  
DISPONIBILIDADE DO OSCILADOR DO MOLDE DE UMA MÁQUINA  
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2017**

**SEVERINO ALBANI JUNIOR**

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E  
DISPONIBILIDADE DO OSCILADOR DO MOLDE DE UMA MÁQUINA  
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

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

Co-orientador: Prof. Denis Mazzei

**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 DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE DO  
OSCILADOR DO MOLDE DE UMA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

por

SEVERINO ALBANI JUNIOR

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

---

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

---

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

---

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

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

Dedico este trabalho à minha família Angelina, Henrique e Arthur Albani, pelos momentos de ausência. Também dedico aos meus pais que me proporcionaram o estudo necessário para alcançar meus objetivos.

## RESUMO

Albani Junior, Severino. **ANÁLISE DA CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE DO OSCILADOR DO MOLDE DE UMA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO.** 2017. 79. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Os desafios encontrados no mercado siderúrgico exigem das empresas a contínua busca pela excelência dentro de um contexto de otimização de custo, com um risco aceitável para o desempenho desejado. Nesse cenário, a Engenharia de Confiabilidade viabiliza a aplicação de diferentes metodologias, com destaque para a análise de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade (do Inglês Reliability, Availability and Maintainability – RAM). Esse trabalho busca definir uma metodologia de utilização da Análise RAM em ativos da ArcelorMittal Tubarão para entender as variáveis que influenciam a disponibilidade dos ativos e direcionar esforços para maximizar a produção. A título de aplicação, a metodologia proposta foi utilizada no Oscilador de Molde de uma Máquina de Lingotamento Contínuo e permitiu conhecer os fatores que influenciam na confiabilidade e manutenibilidade desse sistema, bem como definir ações de controle adequadas. A aplicação da Análise RAM atingiu os objetivos esperados e demonstrou ser uma ferramenta estratégica para definição das tarefas de manutenção e adequação de projeto para as tomadas de decisão assertivas.

**Palavras-chave:** Engenharia de Confiabilidade. Manutenibilidade. Análise RAM.

## ABSTRACT

Albani Junior, Severino. **ANALYSIS OF THE RELIABILITY, MAINTAINABILITY AND AVAILABILITY OF THE OSCILLATOR OF THE MOLD OF A CONTINUOUS INJECTION MACHINE.** 2017. 79. Monography (Specialization in Reliability Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2017. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, ano de defesa.

The challenges encountered in the steel market require companies to continually strive for excellence within a context of cost optimization, with an acceptable risk to the desired performance. In this context, Reliability Engineering makes possible the application of different methodologies, with emphasis on Reliability, Maintainability and Availability (RAM Analysis). This work seeks to define a methodology to use RAM Analysis in ArcelorMittal Tubarão assets to understand the variables that influence asset availability and direct efforts to maximize production. As an application, the proposed methodology was used in the Mold Oscillator of a Continuous Casting Machine and allowed to know the factors that influence the reliability and maintainability of this system, as well as to define adequate control actions. The application of the RAM Analysis reached the expected objectives and proved to be a strategic tool to define the maintenance tasks and design adequacy for the assertive decision making.

**Palavras-chave:** Reliability Engineering. Maintainability. RAM Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1.1 - Histórico de produção de aço no mundo .....	13
Gráfico 1.2 - Histórico de produção de aço na China .....	14
Gráfico 1.3 - Histórico de produção de aço na América do Sul .....	14
Gráfico 1.4 - Preço/tonelada de aço laminado a quente entre 2013 a 2015 .....	15
Gráfico 1.5 - Tempo de Paradas por Equipamento .....	21
Figura 1.1: Processo integrado para produção de Placa e Bobina .....	16
Figura 1.2: Placas produzidas no Lingotamento Contínuo .....	17
Figura 1.3: Etapas para desenvolvimento do estudo .....	22
Figura 2.1: Processo de Lingotamento Contínuo .....	25
Figura 2.2: Vista lateral da MLC.....	26
Figura 2.3: Torre giratória .....	27
Figura 2.4: Carro distribuidor.....	28
Figura 2.5: Carro barra falsa .....	29
Figura 2.6: Segmento de laminação.....	30
Figura 2.7: Servo cilindro.....	31
Figura 2.8: Prolongamento da haste.....	31
Figura 2.9 : Mesa de rolos .....	33
Figura 2.10: Máquina de corte .....	33
Figura 3.1: Sistemas estratificados em subsistemas e componentes .....	36
Figura 3.2: Modelos de simulação para Análise RAM .....	38
Figura 3.3: Definição dos limites e fronteiras de sistemas.....	40
Figura 3.4: Arranjo físico x arranjo de confiabilidade.....	41
Figura 3.5: Classificação de redundâncias (adaptado de Pallerosi, 2007).....	45
Figura 3.6: Time To Repair e Time Between Failure .....	46
Figura 4.1: DBF da MLC .....	48
Figura 4.2: Posição dos Osciladores na MLC .....	49
Figura 4.3: Diagrama de Blocos Funcional .....	49
Figura 4.4: Diagrama de Blocos de Confiabilidade .....	50
Figura 4.5: Modelo do Cilindro .....	53
Figura 4.6: Função de manutenibilidade do cilindro .....	54
Figura 4.7. Função densidade probabilidade do prolongamento .....	55
Figura 4.8: Função de Manutenibilidade da Haste .....	56
Figura 4.9: Resultado da simulação sem preventiva .....	57
Figura 4.10: Confiabilidade do sistema .....	58
Figura 4.11: Importância de Confiabilidade .....	58
Figura 4.12: Importância de Confiabilidade .....	59
Figura 4.13: Tempo do sistema fora de operação .....	60
Figura 4.14: Tempo indisponível dos blocos.....	62
Figura 4.15: Tempo indisponível dos blocos .....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Maiores Produtores de Aço do Mundo .....	16
Quadro 1.2: Equipe envolvida .....	22
Quadro 2.1: Dimensões dos produtos produzidos na MLC .....	26
Quadro 4.1: Fontes de Registro de Falhas .....	50
Quadro 4.2: Exemplo de registro de parada .....	51
Quadro 4.3: Dados consolidados de falhas .....	52
Quadro 4.4: Resultado da análise de alocação .....	59
Quadro 4.5: Disponibilidade do sistema .....	61
Quadro 4.6: Ações propostas para Análise RAM .....	63
Quadro 4.7: Ações propostas para melhorar a disponibilidade do Oscilador.....	63



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AGAN - As Good As New  
AMT – ArcelorMittal Tubarão  
CMMS – Computer Maintenance Management System  
DBC – Diagrama de Bloco de Confiabilidade  
DBF – Diagrama de Bloco Funcional  
FMEA – Failure Mode and Effect Analysis (Análise de Modo de Falha e seus Efeitos)  
ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional de Padronização)  
LRU - Lowest Replacement Unit  
MNM - Menor Nível Manutenível  
MLC – Máquina de Lingotamento Contínuo  
MTBF – Mean Time Between Failures (Tempo Médio entre Falhas)  
MTTF – Mean Time To Failure (Tempo Médio para Falhar)  
MTTR – Mean Time To Repair (Tempo Médio para Reparar)  
NBR – Norma Brasileira  
OS – Oscilador do Molde  
PDF - Probability Density Function (Função Densidade Probabilidade)  
RAM – Reliability, Availability and Maintainability (Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade)  
RBD - Reliability Block Diagram (Diagrama de Bloco de Confiabilidade)  
RCA – Root Cause Analysis (Análise de Causa Raiz)  
RCM – Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada em Confiabilidade)  
TBF - Time Between Failures (Tempo Entre Falhas)  
TTR - TIME TO REPAIR (TEMPO PARA REPARAR)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$  – parâmetro de forma da distribuição Weibull

$\eta$  – parâmetro de escala da distribuição Weibull

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	TEMA DA PESQUISA .....	13
1.2	PREMISSAS, RESTRIÇÕES E PROBLEMA DE PESQUISA .....	18
1.3	OBJETIVOS .....	19
1.3.1	Objetivos Gerais .....	19
1.3.2	Objetivos Específicos .....	19
1.4	JUSTIFICATIVA .....	20
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	21
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	23
<b>2</b>	<b>MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO .....</b>	<b>25</b>
2.1	ÁREA DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO .....	25
2.2	TORRE GIRATÓRIA .....	26
2.3	CARRO DISTRIBUIDOR .....	27
2.4	CARRO BARRA FALSA .....	28
2.5	MOLDE E SEGMENTOS .....	29
2.5.1	Oscilador do Molde de Placas .....	30
2.6	SISTEMAS HIDRÁULICOS .....	32
2.7	MESA DE ROLOS, MÁQUINA DE CORTE E MARCAÇÃO .....	32
2.8	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	34
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>35</b>
3.1	CONCEITOS BÁSICOS .....	35
3.1.1	Sistemas .....	35
3.1.2	Sistemas Reparáveis e Não Reparáveis .....	36
3.1.3	Análise RAM .....	36
3.2	ETAPAS DA ANÁLISE .....	38
3.2.1	Definição do Escopo a ser Estudado .....	38
3.2.2	Definição dos Limites e Fronteiras do Sistema .....	39
3.2.3	Construção do Diagrama de Blocos de Confiabilidade .....	40
3.2.4	Coleta de Dados de Falha e de Manutenção .....	42
3.2.5	Modelamento das Curvas de Vida e de Reparo .....	43
3.2.6	Simulação do Sistema .....	43
3.2.7	Análise dos Resultados e Proposição de Melhorias .....	44
	Figura 3.6: <i>Time To Repair e Time Between Failure</i> .....	46
3.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	46
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>47</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO ESCOPO .....	47
4.2	DEFINIÇÃO DOS LIMITES FÍSICOS E FRONTEIRAS DO SISTEMA ..	47
4.3	DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE .....	49
4.4	COLETA DE DADOS .....	50
4.5	MODELAR DADOS .....	53
4.5.1	Servo Cilindro de Oscilação .....	53

4.5.1.1	Análise de Confiabilidade .....	53
4.5.1.2	Análise de Manutenibilidade.....	54
4.5.2	Prolongador da Haste.....	55
4.5.2.1	Análise de Confiabilidade .....	55
4.5.2.2	Análise de Manutenibilidade.....	55
4.6	SIMULAR: ANÁLISE RAM DO SISTEMA.....	56
4.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	57
4.7.1	Grau de Importância de confiabilidade por bloco .....	57
4.7.2	Análise de alocação .....	59
4.7.3	Análise dos blocos durante a falha .....	60
4.7.4	Análise da disponibilidade do sistema .....	61
4.7.5	Propostas de Melhorias .....	63
4.8	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
	<b>ÍNDICE ONOMÁSTICO.....</b>	<b>70</b>
	<b>ÍNDICE REMISSIVO .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 TEMA DA PESQUISA

Os desafios impostos pelo mercado de diferentes segmentos vêm exigindo dos produtores diferenciada capacidade de gestão para que possam se antecipar aos problemas. Aumentando a previsibilidade nas tomadas de decisão, reduzindo o risco do negócio e potencializando o retorno financeiro dos investidores.

O aumento do uso da gestão de risco nas empresas abre espaço para a inovação, o desenvolvimento e aplicação de diferentes ferramentas.

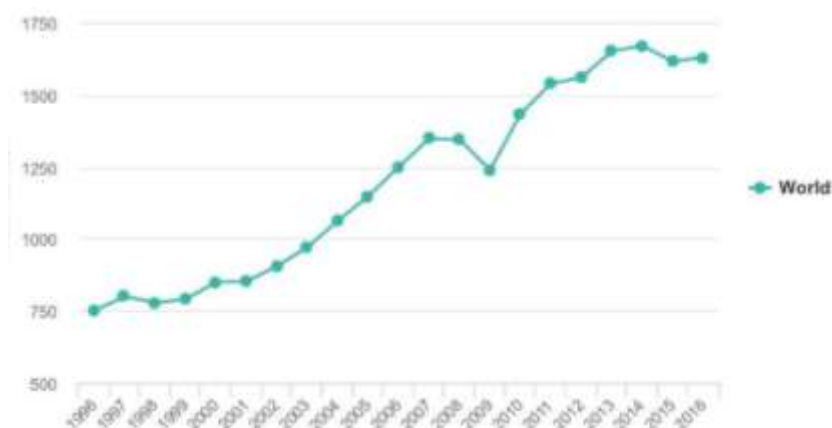
A Engenharia de Confiabilidade viabiliza a aplicação de diferentes metodologias permitindo que as decisões sejam tomadas dentro de um cenário de viabilidade financeira, temporal, desempenho dos processos e riscos aceitáveis. Esses requisitos são alguns dos benefícios alcançados com a implantação da Gestão de Ativos de acordo com a ISO55000.

Dentre as diferentes metodologias, a análise de Confiabilidade se destacada. Ela proporciona a identificação dos fatores que mais afetam a disponibilidade dos sistemas e permite definir ações de controle para maximizá-la.

A Siderurgia mundial é um dos mercados desafiados pelas oscilações ocorridas nos últimos tempos, principalmente após a crise de 2008 como pode ser observado no Gráfico 1.1 em que a taxa de crescimento foi reduzida.

Gráfico 6.1 - Histórico de produção de aço no mundo

#### Produção de aço 1996 – 2016 (milhões de toneladas)

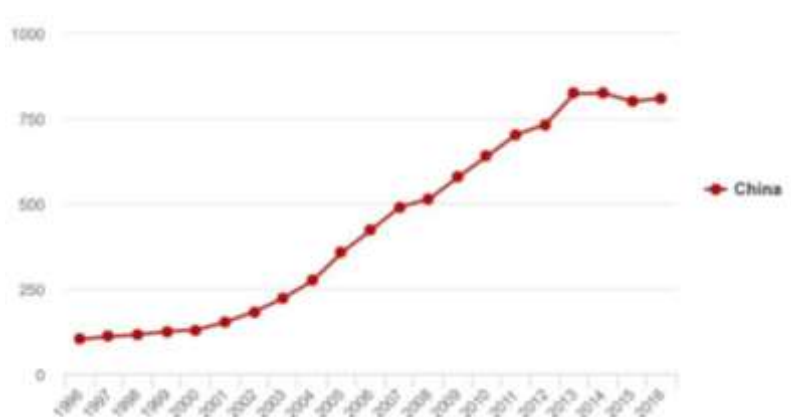


Fonte: World Steel Association (2017).

A recuperação da produção mundial ocorrida após 2008 foi influenciada principalmente pela produção da China, que mesmo em um cenário de crise, apresentava taxas de crescimento que propiciaram o crescimento da produção de aço (Gráfico 1.2).

Gráfico 1.7 - Histórico de produção de aço na China

### Produção de aço na China 1996 – 2016 (milhões de toneladas)

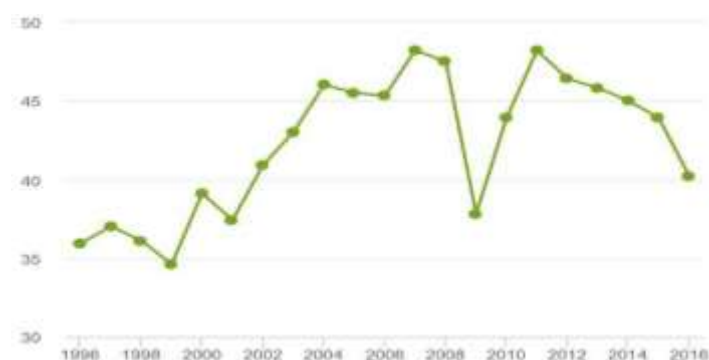


Fonte: World Steel Association (2017).

Em um cenário bem diferente e desafiador a América do Sul teve sua produção influenciada negativamente com a crise (Gráfico 1.3), levando várias plantas a fecharem Altos Fornos, não retomando suas operações até o primeiro trimestre de 2017.

Gráfico 1.8 - Histórico de produção de aço na América do Sul

### Produção de aço 1996 – 2016 (milhões de toneladas)



Fonte: World Steel Association (2017).

Além da produção, os preços do aço no mundo também foram impactados. Estes, no entanto, não apresentaram o mesmo nível de recuperação observado na produção. O Gráfico 1.4 mostram o comportamento do preço do aço no período de 2013 a 2015.

Gráfico 1.9 - Preço/tonelada de aço laminado a quente entre 2013 a 2015

#### Produção de aço na China 1996 – 2016 (milhões de toneladas)



Fonte: Will Adams (2016).

Esse cenário motivou as grandes corporações do setor a buscarem inovações para se posicionarem nesse mercado desafiador e competitivo através da diversificação dos portfólios de produtos e otimização dos gastos produtivos.

Dentre os grandes *players* da Siderurgia mundial, destaca-se a ArcelorMittal que é a maior produtora de aço no mundo (Quadro 1.1). Ela está presente em mais de 60 países, com unidades produtoras de aços e de distribuição que permitem capilarizar a distribuição de seus produtos. No Brasil uma unidade é a ArcelorMittal Tubarão que é considerada a maior produtora de placas da América do Sul.

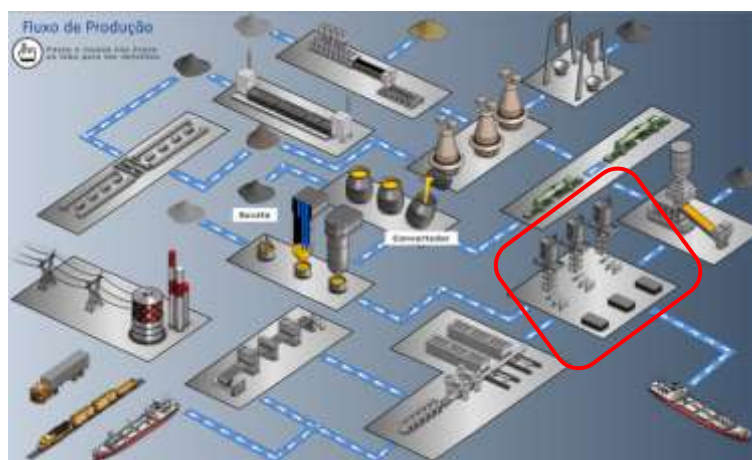
Quadro 1.3 - Maiores Produtores de Aço do Mundo

Ranque	Empresa	Toneladas
1	ArcelorMittal	97,14
2	Hesteel Group	47,75
3	NSSMC	46,37
4	Posco	41,97
5	Boasteel Group	34,94
6	Shagang Group	34,21
7	Ansteel Group	32,5
8	JFE Steel Corporation	29,83
9	Shougang Group	28,55
10	Tata Steel Group	26,31

Fonte: World Steel Association (2017).

Essa unidade possui um sistema de produção integrado, com recebimento das matérias primas básicas como carvão e minério, gerando placas e bobinas como produto acabado para diferentes mercados. A Figura 1.1 apresenta esse fluxo, com destaque para a etapa de lingotamento contínuo.

Figura 1.1: Processo integrado para produção de Placa e Bobina



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2017).

O Lingotamento Contínuo (Figura 1.2) é a etapa do processo produtivo em que o aço líquido é moldado e lingotado para a geração das placas de aço. Partes dessas placas são vendidas diretamente para o mercado e parte segue no processo para produção de bobinas que são vendidas nos mercados nacionais e internacionais.



Figura 1.2: Placas produzidas no Lingotamento Contínuo



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2017)

Como a Máquina de Lingotamento Contínuo está posicionada na etapa final do processo produtivo, falhas com paradas operacionais ocasionam perda de produção com difícil recuperação. Essas falhas podem ser causadas por manutenções inadequadas e falta de habilidade para prever problemas que possam ocorrer (Komal et al., 2010). O grande desafio é identificar qual ferramenta mais adequada para alcançar os resultados desejados.

Existem diversas ferramentas aplicáveis na análise de sistemas tais como *Root Cause Analysis (RCA)*, *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*, *Reliability Availability and Maintainability (RAM)*. A Análise RAM é uma ferramenta de engenharia que permite avaliar o desempenho do equipamento em diferentes estágios (Sharma e Kumar, 2008).

Corvaro et al. (2017) cita que a análise RAM possui uma abordagem estratégica que integra a análise de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, usando métodos, ferramentas e técnicas de engenharia para identificar e quantificar falhas de equipamentos que impedem o alcance dos objetivos produtivos.

Além das ferramentas já citadas para análise de sistemas, também é possível destacar o *Reliability Centered Maintenance (RCM)* e o *Risk Based Inspection (RBI)* que vêm sendo empregados com maior exatidão nas empresas. Herder et al. (2008) cita que a previsão do aumento da confiabilidade das plantas levará a menos pessoas trabalhando nas plantas e menor probabilidade de

acidentes pessoais e ambientais, sendo possível para isso a utilização da análise RAM.

Corvaro et al. (2017) cita que a análise RAM é um modelo de tomada de decisão usado para aumentar a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade dos equipamentos e suporta um sistema de gestão dentro de um risco tolerável.

É possível dizer que a Análise RAM é uma robusta ferramenta que permite analisar os sistemas em seus diferentes estágios dentro do ciclo de vida.

## 1.2 PREMISSAS, RESTRIÇÕES E PROBLEMA DE PESQUISA

A maioria das indústrias possuem sistemas com alto grau de complexidade, mas que podem ser recuperados. Para estimar os tempos de falhas e tempos de reparos com maior precisão é recomendável ter uma grande quantidade de registros confiáveis. Isso nem sempre é possível, podendo influenciar no resultado da análise RAM (Komal et al., 2010).

Uma hipótese é realizar uma avaliação com o time envolvido na manutenção e operação com objetivo de extrair informações de falhas e tempos de manutenção, além de outras informações relacionadas ao histórico dos equipamentos que possam contribuir durante o estudo.

A empresa passou nos últimos cinco anos um processo natural de renovação de seus empregados após completar 30 anos de operação. Muitos dos atuais colaboradores possuem pouco tempo de experiência, podendo influenciar negativamente na busca de informações.

Assim sendo, para o desenvolvimento desse trabalho foi levado em consideração as seguintes premissas:

- Todos os dados de falhas foram registrados no ultimo nível manutenível e são confiáveis, permitindo aplicação prática da análise RAM;
- Quando inexistente dados de falhas e de manutenção, aplicar a técnica de entrevista de confiabilidade;
- Quando não for possível obter dados de falha e de manutenção através de entrevistas, considerar taxas de falha e de reparo constantes ao longo do tempo e estatisticamente independente;

- Todos os reparos realizados foram considerados “Tão Bom Quanto Novo”, ou do inglês “*As Good As New (AGAN)*” (Fator de restauração igual a 1);
- Todos os reparos considerados nessa análise são corretivos;
- Existem duas condições dos componentes: operando e em estado de falha;

Dentro do contexto de aumentar a disponibilidade dos sistemas dentro de um apetite de risco desejável, existem algumas questões importantes que precisam ser respondidas:

- Qual a confiabilidade e disponibilidade do Oscilador do Molde da Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC) para a atual configuração?
- Quais ações são recomendadas para aumento da disponibilidade?

Esse trabalho detalha as etapas seguidas na busca das diferentes respostas para essas perguntas.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desse trabalho é propor aplicação da análise RAM, por meio de um método padronizado, no Oscilador de Molde de uma Máquina de Lingotamento Contínuo.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Dentre os vários objetivos possíveis com a análise RAM, esse trabalho visa alcançar os seguintes resultados:

- Definir os limites físicos e funcionais do sistema de Oscilador do Molde;
- Desenvolver um diagrama de blocos de confiabilidade, do inglês *Reliability Block Diagram (RBD)*;
- Coletar os dados de falhas e tempos de manutenção dos blocos, equipamentos ou componente;
- Avaliar a viabilidade de uso dos dados coletados;

- Realizar um estudo de análise de dados de vida;
- Realizar uma análise de sistemas;
- Identificar o MTBF do sistema;
- Identificar os “*bad actors*”;
- Identificar a disponibilidade do Oscilador para a atual condição operacional;

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Aumentar a disponibilidade é uma necessidade presente na indústria siderúrgica. Isso é possível através da redução de falhas e otimização nos tempos de manutenção. Nas linhas finais de produção que já se encontram em níveis de utilização próximos aos 100% isso é intensificando, já que tempo perdido de produção não é recuperável, considerando que o mercado demanda tudo que é produzido.

Os conceitos de engenharia de confiabilidade até então não vinham sendo aplicados de maneira estruturada na ArcelorMittal Tubarão. A partir de agora, o seu uso poderá gerar grande melhora no desempenho dos ativos e no resultado do negócio.

Nesse contexto, esse trabalho visa estabelecer um roteiro de aplicação para os conceitos de Engenharia de Confiabilidade focada na análise RAM. Isso permitirá conhecer a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade dos equipamentos da MLC, permitindo adotar estratégias efetivas de manutenção e reprojeto a fim de otimizar os custos de manutenção e melhorar disponibilidade dos equipamentos.

Portanto, viabilizará a empresa extrair maior valor dos seus ativos para o alcance dos objetivos definidos no plano estratégico, seja no âmbito financeiro, de segurança, operacional e seus stakeholders como clientes e comunidade. Isso está diretamente conectado com os conceitos definidos na NBR ISO55000(ABNT NBR ISO 55000, 2014). Também permitirá a disseminação da metodologia para que outras unidades produtivas possam utilizar em trabalhos futuros.

Gráfico 1.10: Tempo de Paradas por Equipamento



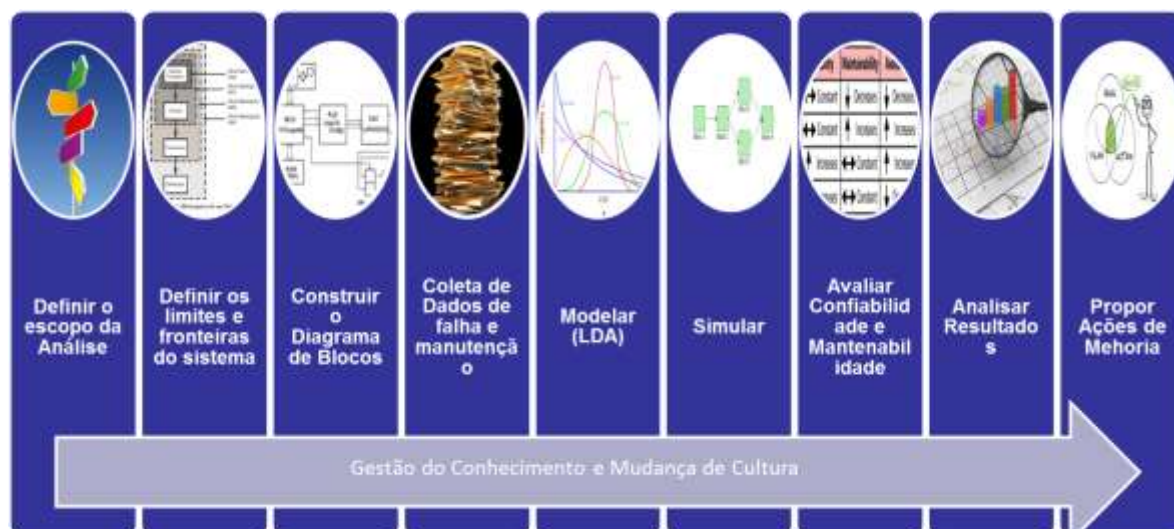
Fonte: Própria (2017).

O gráfico 1.5 mostra a estratificação dos vinte equipamentos com maior tempo de falha em horas de janeiro de 2014 a junho de 2017. Nesse período o total de falhas soma mais de 1.300 horas de parada, o que demonstra o potencial de aumento de disponibilidade de equipamentos. O Oscilador de Molde é o equipamento que apresenta 161 horas de falhas nesse período, sendo escolhido como equipamento a ser aplicado a metodologia definida nesse trabalho.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho, diferentes metodologias foram aplicadas para melhoria dos processos e alcance dos objetivos desejados. Essencialmente o processo se desdobrará em sete etapas como apresentado na Figura 1.3. A gestão do conhecimento e a mudança de cultura estão permeadas por todas as etapas desse trabalho, trazendo conhecimento intelectual e levando a empresa para um novo patamar de gestão de equipamentos.

Figura 1.3: Etapas para desenvolvimento do estudo



Fonte: Própria (2017).

Para o sucesso desse trabalho é necessário a participação e o engajamento de uma equipe multidisciplinar. Também é importante definir pessoas que agreguem valor na análise, isto é, pessoas que detenham o conhecimento necessário, evitando assim equipes grandes que pode gerar conversas paralelas e improdutividade. A equipe deve ser formada pelas pessoas conheçam dos equipamentos e tenham as informações certas.

Quadro 1.4: Equipe envolvida

Equipe de Trabalho		
Lubrificador	Técnico de Controle de Processo	Operador
Eletricista	Inspetor Mecânico	Supervisor de Operação
Instrumentista	Inspetor Elétrico	Engenheiro de Operação
Mecânico	Supervisor de Manutenção	Gerentes das Áreas de Manutenção
Técnico de Planejamento	Engenheiro de Manutenção	Gerentes das Áreas de Operação
Técnico de Sobressalentes	Técnico de Manutenção	Engenheiro de Confiabilidade

Fonte: Adaptado do Plano diretor de Manutenção e Gestão de Ativos (2013).

Na Máquina de Lingotamento Contínuo foram envolvidos os diferentes atores das diferentes equipes de manutenção, operação e engenharia (Quadro 1.2).

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A organização desse trabalho foi feita buscando a separação dos assuntos em cinco capítulos, visando organizar e facilitar o entendimento. Esses capítulos estão detalhados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução;
- Capítulo 2: Máquina do Lingotamento Contínuo;
- Capítulo 3: Referencial Teórico;
- Capítulo 4: Desenvolvimento;
- Capítulo 5: Conclusão;

O Capítulo 1, responsável pela Introdução do trabalho, busca contextualizar o problema a ser estudado, direcionando do cenário siderúrgico mundial até o sistema objeto deste estudo. Também apresenta as diferentes ferramentas da Engenharia de Confiabilidade, sua importância e os seus benefícios, permitindo definir o problema e escopo a ser estudo. Nessa fase as premissas e restrições também são definidas.

O Capítulo 2 foca na Máquina de Lingotamento Contínuo, detalhando seu papel e importância dentro do processo siderúrgico da ArcelorMittal Tubarão por ser responsável por produzir placas de aço. Todas as funções dos principais sistemas estão descritas nesse capítulo, realizando maior detalhamento no Sistema do Oscilador do Molde, local onde a metodologia é aplicada.

O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica da Análise RAM, os conceitos necessários para entendimento da metodologia proposta e também define o modelo da Análise RAM a ser aplicada. Nesse capítulo também é definido as nove etapas propostas para uso da metodologia e detalha a forma de aplicar cada uma dessas etapas.

O Capítulo 4 aplica o modelo de Análise RAM proposto no Capítulo 3 no Sistema do Oscilador do Molde. Apresenta todas as etapas, com especial destaque para a coleta de dados. Nessa etapa foi identificado que muito dos registros existentes não estão em condições de utilização para os estudos da Análise RAM, o que demandou de mais tempo que o previsto e levanta uma oportunidade de trabalho para melhora da qualidade dos dados. Também nesse capítulo foi realizado

o modelamento da função densidade probabilidade dos componentes estudados e a simulação do sistema.

O Capítulo 5 apresenta a análise de alguns dos resultados possíveis de serem obtidos nesse tipo de análise. Dessa forma é possível direcionar as ações de controle para maximizar os resultados. As ações de controle foram estratificadas em dois grupos, sendo um de ações estratégicas para garantir a aplicação dessa metodologia em outros sistemas e ações específicas para o Oscilador, buscando aumento de sua disponibilidade.

Apresenta a conclusão do trabalho nesse Capítulo, destacando o sucesso para os resultados obtidos e o potencial do modelo apresentado. Finaliza esse capítulo propondo aplicação desse modelo em outros processos produtivos bem como os resultados alcançáveis, que estão alinhados aos conceitos de Gestão de Ativos.



## 2 MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

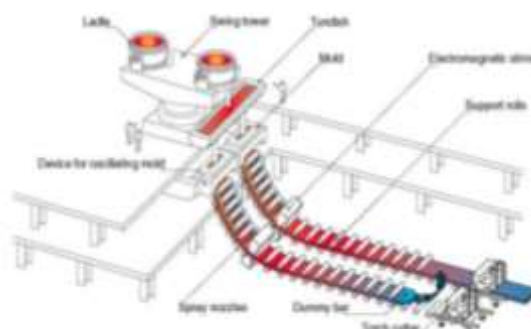
### 2.1 ÁREA DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O objetivo deste capítulo é apresentar as características da Máquina de Lingotamento Contínuo, seus diferentes subsistemas e suas respectivas inter-relações. Isso permitirá o entendimento do processo em que os estudos de confiabilidade serão aplicados.

A primeira Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC) da ArcelorMittal Tubarão (AMT) foi instalada em 12 de abril de 1995, dentro de um plano de expansão definido pela empresa. Essa nova unidade renovou o processo de laminação da AMT permitindo produzir com mais qualidade, quantidade e segurança as placas de aço.

A MLC possui dois veios produtivos como pode ser observado na Figura 2.1, permitindo produzir continuamente duas placas de aço em paralelo durante todo processo de lingotamento. Essa figura também mostra as diferentes partes que compõem uma Máquina de Lingotamento Contínuo.

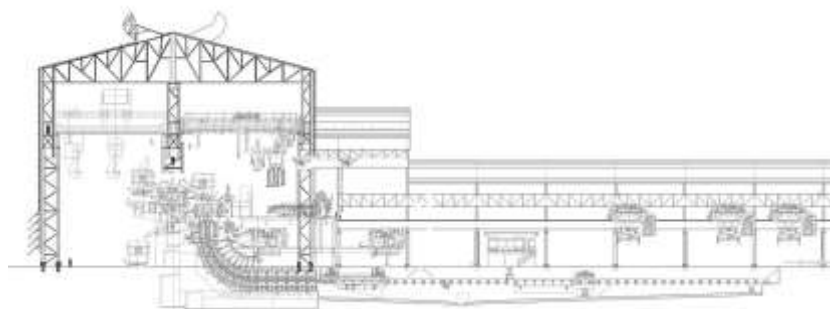
Figura 2.1: Processo de Lingotamento Contínuo



Fonte: Respira Vitória (2013).

A Figura 2.2 mostra uma visão lateral de todo processo de lingotamento, desde o ponto de recebimento das panelas pelas pontes rolantes, até a região de despacho das placas produzidas. É possível observar também o galpão e toda configuração em termos de diferença de nível e espaço físico que uma Máquina de Lingotamento Contínuo precisa obedecer.

Figura 2.2: Vista lateral da MLC



Fonte: Ponto de Apoio Engenharia e Arquitetura (2005).

A capacidade nominal de produção dessa máquina é 2.400.000 toneladas de placas de aço por ano. Esse volume é produzido dentro da ampla gama de tipos de aços, respeitando os limites dimensionais da máquina demonstrada na Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Dimensões dos produtos produzidos na MLC

Dimensões (mm)	
LARGURA	750 a 2325
COMPRIMENTO	5000 a 12500 mm
ESPESSURA	200, 225, 250 mm.

Fonte: Própria (2017).

A MLC é composta por diferentes subunidades. Essas subunidades possuem características específicas que dentro do arranjo produtivo permite atingir o volume de produção especificado. A seguir serão detalhadas as principais subunidades do processo de laminação.

## 2.2 TORRE GIRATÓRIA

Todo processo começa com o recebimento das panelas com aço líquido na Torre Giratória. Esse equipamento tem a função de receber a panela e transladá-la até a posição de lingotamento localizado a 180° da posição de recebimento. Nesse mesmo momento em que está sendo posicionada a panela cheia de aço, está ocorrendo à retirada da panela vazia que já foi lingotada.

Figura 2.3: Torre giratória



Fonte: Lima & Zanette [12] (2017).

A Figura 2.3 mostra um tipo de torre giratória onde cada braço da torre está suportando uma panela, uma em lingotamento e outra no lado de recebimento. Esse sistema é composto por uma robusta estrutura metálica que visa suportar uma carga de aproximadamente 900 toneladas (panelas cheias e vazias). Os diferentes movimentos executados por essa Torre são realizados por diferentes sistemas, como um conjunto motor e redutor, sistema hidráulico, pneumáticos dentre outros. A Torre também possui todo um sistema de utilidades, visando permitir os controles operacionais necessários.

### 2.3 CARRO DISTRIBUIDOR

Seguindo o fluxo produtivo, o Carro Distribuidor é um equipamento que posiciona o distribuidor por debaixo da panela de aço e posiciona as válvulas necessárias para permitir o vazamento do aço da panela para o distribuidor. Este equipamento distribui o aço para os dois veios de laminação para a formação das placas. A Figura 2.4 mostra o carro com o próprio distribuidor e o momento em que o pré-aquecedor é posicionado para iniciar o processo de aquecimento do distribuidor.

Figura 2.4: Carro distribuidor



Fonte: Ponto de Apoio Engenharia e Arquitetura (2005).

Para cada MLC existem dois carros distribuidores, um em lingotamento e outro em preparação ou *stand by*. Na preparação é feito o pré-aquecimento dos distribuidores, válvulas refratadas que estarão em contato com o aço líquido. Isso é necessário para não causar danos nos componentes por conta do choque térmico.

#### 2.4 CARRO BARRA FALSA

O Carro Barra Falsa é o equipamento responsável pela preparação para início do lingotamento. Esse mecanismo insere dentro de cada veio uma estrutura metálica que é responsável pela suportação de todo aço líquido despejado nos veios. É nesse momento que é realizada toda selagem impedindo que o aço líquido em alta temperatura vaze para dentro dos veios, o que poderia causar danos nos equipamentos e perda produtiva.

Dentro desse sistema existem um conjunto motoredutor responsável pela translação do carro. Existe outro conjunto motoredutor, responsável pelo içamento e descida da barra falsa. A mesa de apoio da barra falsa é formada por uma robusta estrutura metálica.

Figura 2.5: Carro barra falsa



Fonte: Lima & Zanette (2017).

Outra função importante desse sistema é a inserção do robô que realiza toda verificação dimensional do veio, permitindo confirmar as tolerâncias permissíveis para cada sequência de placa produzida. Também permite verificar desvios de funcionamento com os rolos de lingotamento, como por exemplo, se estão travados ou deformados. A Figura 2.5 apresenta de forma geral o Carro Barra falsa.

## 2.5 MOLDE E SEGMENTOS

Iniciado o lingotamento, com a barra falsa devidamente posicionada, o distribuidor distribui o aço para os moldes de cada veio. Os moldes são responsáveis basicamente por duas funções, sendo a primeira a moldagem do aço dentro das dimensões especificadas, a outra função, não menos importante, é iniciar o processo de resfriamento da placa.

É no molde que esse processo de resfriamento é iniciado e deve ser realizado dentro dos parâmetros devidamente controlados para que não ocorra o que é chamado de rompimento de pele. Esse rompimento ocorre quando a película externa do aço solidificado é seccionada fazendo com que o núcleo da placa formada por aço líquido vaze pela extremidade, danificando equipamentos e paralisando a produção.

Após o molde, existem quatorze segmentos montados em cada um dos dois veios, eles darão prosseguimento ao processo de formação da placa até a saída da máquina de lingotamento. Nessa fase o resfriamento é realizado dentro do controle necessário para que a placa obtenha algumas das propriedades mecânicas exigidas

para os materiais. A Figura 2.6 mostra um dos segmentos que são montados em máquinas de lingotamento contínuo.

Figura 2.6: Segmento de laminação



Fonte: Dedini (2017).

Existem sistemas de resfriamento independentes dentro do processo de lingotamento. Um deles é responsável pelo resfriamento das placas produzidas, enquanto outro resfria as estruturas metálicas do compartimento em que os segmentos estão montados. Essa estrutura é chamada de Câmara de Spray e ela permite conter todo vapor produzido nesse processo de resfriamento e direcioná-lo para os exaustores e chaminés. Por último, tem o sistema de resfriamento dos moldes e segmentos que estão mais próximos da placa e necessitam ter sua temperatura controlada.

### 2.5.1 Oscilador do Molde de Placas

A oscilação do molde tem grande importância para o processo de Lingotamento Contínuo de Placas, pois ela impede que a pele da placa cole nas paredes do molde, impedindo assim que haja o rompimento dessa pele, evento que interrompe o processo de lingotamento.

Para isso, o oscilador deve oscilar o molde fazendo com que o pó fluxante penetre entre a superfície em solidificação e as paredes do molde, atuando como

um lubrificante para evitar o contato direto entre as superfícies e garantir a correta oscilação do molde, assegurando uma melhor qualidade da superfície das placas lingotadas.

Figura 2.7: Servo cilindro



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2017).

O Oscilador do molde da Máquina de Lingotamento Contínuo é um equipamento eletro hidráulico operando em malha de controle fechada, composto por um servo-cilindro hidráulico (Figura 2.7) e um prolongamento do cilindro (Figura 2.8), envolto em uma proteção sanfonada.

Esses prolongamentos são montados em um conjunto de bases, fixa e móvel, interligadas por um feixe de molas. O movimento de avanço e recuo é responsável por deformar as molas. Tal movimento é controlado para que a base oscile em movimento senoidal.

O sistema de controle é responsável por assegurar que os dois cilindros sejam acionados de forma simultânea, garantindo que os movimentos estejam em fase e com o mesmo deslocamento.

Figura 2.8: Prolongamento da haste



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2017).

Esse prolongamento é montado em um conjunto de bases, fixa e móvel, interligadas por um feixe de molas, que com o movimento do cilindro deforma as molas gerando um movimento senoidal. Esse movimento tem amplitude e frequência determinada pela velocidade de lingotamento.

Cada MLC possui dois veios de lingotamento, cada um possui dois osciladores, totalizando quatro osciladores por máquina de lingotamento. Esse sistema está presente nas MLC 1 e 2.

## 2.6 SISTEMAS HIDRÁULICOS

Os diferentes sistemas hidráulicos da MLC são responsáveis por fornecerem toda energia hidráulica necessária para operação dos diferentes equipamentos ao longo de todo processo de lingotamento. Os principais itens atendidos são:

- Sistema de movimentação e fixação da válvula que permite o vazamento de aço da panela para o distribuidor e deste para o molde;
- Sistema de acionamento do Molde e sua movimentação, também chamado de oscilador do molde;
- Os segmentos, bem como todos os rolos montados internamente;
- Carro distribuidor;
- Carro barra falsa Máquina;
- Máquina de corte e rebarbador;

O sistema do Oscilador do Molde é atendido por um sistema hidráulico compartilhado, que possui um tanque, um sistema de bombeamento e um sistema de envio que atende outros sistemas também.

## 2.7 MESA DE ROLOS, MÁQUINA DE CORTE E MARCAÇÃO

A mesa de rolos é formada por diversos rolos que movimentam a placa desde a saída do segmento quatorze até a região chamada de mesa de saída, onde as placas são direcionadas para os outros processos produtivos como mostrado na Figura 2.9.



Figura 2.9 : Mesa de rolos



Fonte: Alex Larbac (1992).

Dentro da mesa de rolos as placas são cortadas pela Máquina de Corte como mostrado na Figura 2.10. Nessa máquina o maçarico de amostra é responsável pela retirada de amostra da placa para análise química e propriedades mecânicas nos laboratórios internos da usina. Os maçaricos de corte realizam o corte da placa de acordo com o tamanho medido pelo rolo medidor e especificado pelo cliente.

Esse processo de corte utiliza gás natural e oxigênio fornecidos pelas unidades internas de utilidades. Essa máquina possui um sistema de refrigeração formado por jaquetas que permitem a passagem interna de água para troca térmica, minimizando o excesso de calor nos equipamentos, permitindo a realização do corte dentro do tempo necessário e qualidade especificada.

Figura 2.10: Máquina de corte



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2017).

Finalizado o corte, é realizada a retirada de rebarbas pelo Desrebarbador, que é uma máquina formada por sistemas de içamento, posicionamento e corte. Rebarbas e imperfeições nas faces das placas são requisitos de qualidade e

precisam ser eliminados para evitar desclassificações de produtos que afetam a produtividade das máquinas.

Para finalizar o processo realizado dentro da MLC, todas as placas produzidas são identificadas pela Máquina de Marcação que está localizada na mesa de rolos. Depois dessa etapa, as placas estão prontas para seguir para as próximas unidades produtivas ou mesmo para o cliente final, como produto acabado.

Esse capítulo apresentou os diferentes sistemas que compõem a MLC, bem como alguns dos seus equipamentos. Isso permite entender o processo produtivo do Lingotamento Contínuo e a complexa correlação de componentes e variáveis a serem controladas para permitir que a produção ocorra dentro dos parâmetros requeridos. Esse conteúdo será amplamente explorado nos capítulos posteriores durante as abordagens dos estudos de confiabilidade.

## 2.8 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados todos os subsistemas que compõem a Máquina de Lingotamento Contínuo, buscando detalhar como cada um realiza sua específica função dentro do processo. O destaque foi dado para o Oscilador de Molde que é o objeto de aplicação da análise RAM e é o responsável por realizar a oscilação necessária do molde a fim de garantir o escoamento do aço líquido para início do resfriamento e prosseguimento para a formação das placas.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos para o perfeito entendimento do trabalho desenvolvido.

#### 3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Dentro do contexto de confiabilidade é necessário definir alguns conceitos específicos para garantir o perfeito entendimento do estudo realizado.

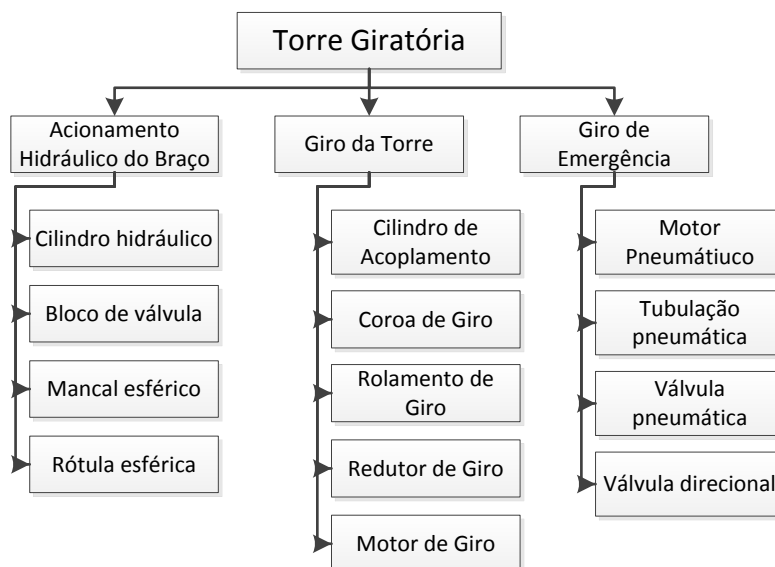
##### 3.1.1 Sistemas

Para desenvolvimento da Análise RAM é importante nivelar alguns conceitos essenciais. O primeiro deles é o conceito de Sistemas.

Pallerosi (2007, p.1) define como Sistema um conjunto de Subsistemas e componentes, combinados entre si de modo específico, correspondentes a dados arranjos físicos, para atingir as condições operacionais desejadas, com custos, performance e confiabilidade necessárias para o objetivo do negócio. As combinações dos arranjos físicos correspondem a um Componente Equivalente que representa o comportamento do sistema.

A Figura 3.1 exemplifica um sistema estratificado em subsistemas e componentes da Torre Giratória.

Figura 3.1: Sistemas estratificados em subsistemas e componentes



Fonte: Própria (2017).

### 3.1.2 Sistemas Reparáveis e Não Reparáveis

Os sistemas podem ser classificados como Reparáveis e Não reparáveis. Os Sistemas Não Reparáveis são classificados dessa maneira, pois não é técnico e economicamente viável realizar a substituição ou reparo de seus componentes, sendo mais adequada a substituição completa do sistema. Essa situação é facilmente encontrada em sistemas eletrônicos que são totalmente substituídos em caso de falha.

Por outro lado, nos sistemas reparáveis é técnico e economicamente mais viável substituir ou reparar os componentes que falham. Existe um representativo número de sistemas enquadrados nessa classificação de sistemas como, por exemplo, um automóvel, uma máquina de lingotamento contínuo e um avião. Grande parte dos sistemas existentes nas indústrias também está classificada nessa categoria. Quando seus componentes falham, eles são reparados ou substituídos. A tônica desse trabalho foi desenvolvida nesse tipo de sistema.

### 3.1.3 Análise RAM

Komal et al. (2010) define análise RAM como uma ferramenta de engenharia usada para avaliar a performance dos equipamentos nos diferentes

estágios de vida e pode ser usado para melhorar e prever a performance do sistema.

A ABNT NBR 5462/94 define o conceito das três métricas que compõem Análise RAM:

**Confiabilidade** (*Reliability*) é a capacidade de um item desempenhar uma função especificada, sob condições e intervalo de tempo predeterminado. Comumente é definida por autores como a probabilidade do sistema desempenhar a função requerida num intervalo de tempo sob determinadas condições operacionais.

**Mantenabilidade** (*Maintainability*) é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. Também pode ser definida como a probabilidade de executar a manutenção num determinado componente sob condições específicas.

**Disponibilidade** (*Availability*) é a capacidade de um item estar em condições de executar certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenabilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

PardeepKumar et al. (2014) define Disponibilidade (Availability) como a probabilidade de um sistema ou equipamento estar em condição de operação para qualquer tempo “t”, sendo uma combinação de Confiabilidade e Manutenabilidade.

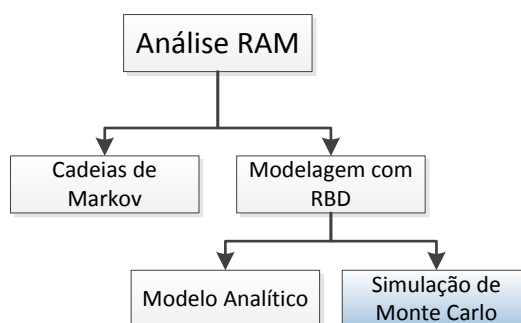
Tendo esses conceitos definidos é importante entender que a verdadeira confiabilidade nunca será exatamente conhecida, que significa que o valor numérico exato dessa probabilidade não é conhecido. Mas estimativas bem próximas desse valor podem ser obtidas através de métodos estatísticos e cálculos de probabilidade (Bazovsky, 2004).

Segundo Herder et al. (2008) o modelamento de confiabilidade para as análises RAM pode ser feita de duas maneiras: baseadas em Cadeias de Markov e através da modelagem com RBD. Para sistemas mais complexos, a

utilização da teoria de Markov pode demandar de esforços excessivos para modelagem e obtenção dos resultados.

O modelamento através do RBD pode ser feito de duas maneiras. A primeira através da vertente analítica que usa funções analíticas para representar o comportamento dos componentes. Outra opção é a simulação de Monte Carlo que usa teoria probabilística e geralmente está presente em softwares disponíveis no mercado. A Figura 3.2 mostra esquematicamente esses caminhos de análise.

Figura 3.2: Modelos de simulação para Análise RAM



Fonte: Própria (2017).

Segundo Calixto (2016) , do ponto de vista metodológico, a Análise RAM pode ser dividida em análise de dados de falha (que está diretamente ligado aos modos de falha dos equipamentos) e dados de reparo, modelamento e simulação.

Esse trabalho foi desenvolvido baseado no caminho que segue a análise da Simulação de Monte Carlo e estratificado nas etapas que será explorada nos tópicos a frente.

## 3.2 ETAPAS DA ANÁLISE

A seguir está detalhado cada etapa a ser seguida para desenvolvimento da análise.

### 3.2.1 Definição do Escopo a ser Estudado

A primeira etapa para realizar a Análise RAM é a definição do escopo que compreende a escolha do sistema a ser estudado e definição do objetivo da análise.

Se o escopo não for devidamente definido a análise pode demandar de muito tempo e não alcançar seu objetivo, podendo cair no descrédito das pessoas envolvidas.

Para evitar essa situação a análise deve ser alavancada por um profissional que possua conhecimento técnico na metodologia, com perfil de liderança para garantir o envolvimento das partes interessadas. A gestão da Análise RAM deve ser tratada com metodologias de gestão de projeto.

Esse profissional deverá realizar um planejamento detalhado, visando identificar todos os recursos necessários para a análise. Mapeados os recursos é recomendável realizar uma reunião de lançamento (*Kick-off meeting*) considerando:

- O escopo do estudo;
- O patrocinador (*Sponsor*) da análise;
- Os objetivos a serem alcançados;
- Os personagens envolvidos;
- As informações necessárias e seus responsáveis (dados de operação, custo, registros de falha e de manutenção, etc);
- Os entregáveis e suas datas ao longo da análise;
- A forma de acompanhamento do estudo (relatório, reunião, etc);

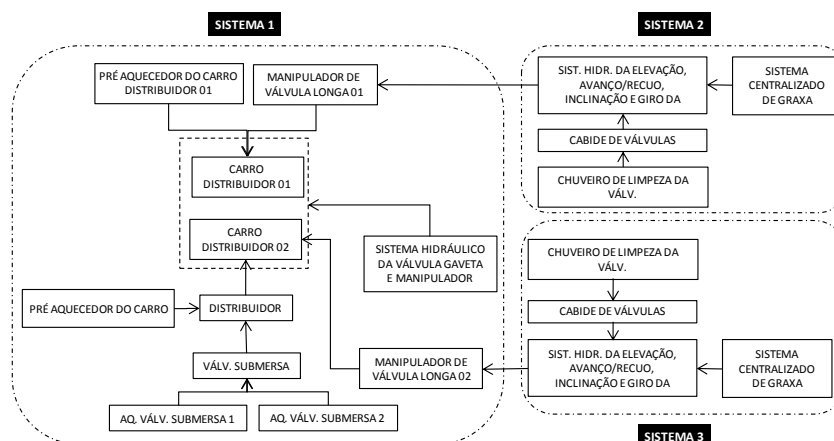
Finalizada essa etapa do planejamento, segue para as próximas fases.

### 3.2.2 Definição dos Limites e Fronteiras do Sistema

Os processos produtivos e grandes equipamentos geralmente são formados por diversos sistemas que possuem inúmeras interfaces. Para garantir uma análise objetiva, é necessário definir detalhadamente as fronteiras do sistema, deixando claro o que deverá ser considerado dentro e fora do estudo.

A Figura 3.3 exemplifica os limites de baterias entre três distintos sistemas. A ferramenta utilizada foi o Diagrama de Blocos Funcional (DBF) que apresenta de uma maneira lógica a função e as inter-relações entre os blocos dentro dos sistemas/processos. Segundo Moubray (1994) , através do DBF é possível mostrar uma hierarquia das funções primárias dos ativos e suas relações funcionais dentro de um mesmo nível hierárquico.

Figura 3.3: Definição dos limites e fronteiras de sistemas



Fonte: Própria (2017).

Existem diversas fontes de informações que podem ser utilizadas para definição desses limites. Uso de projetos, desenhos, conversa com especialistas e fornecedores são as principais fontes para delimitação do estudo. Para sistemas existentes a visita em campo para conhecimento e entendimento do sistema pode ajudar também.

### 3.2.3 Construção do Diagrama de Blocos de Confiabilidade

Os sistemas são constituídos por vários subsistemas e componentes arranjados fisicamente com o objetivo de cumprir uma função requerida. O Diagrama de Bloco de Confiabilidade (DBC), do inglês *Reliability Block Diagram (RBD)* é criado para ilustrar a disposição física de como os componentes são probabilisticamente arranjados para demonstrar a operação do sistema (Pallerosi, 2007). Os arranjos de confiabilidade podem ser classificados como:

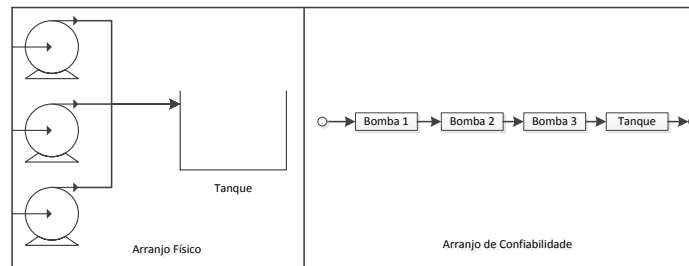
- Série;
- Paralelo;
- Composto;
- Complexo.

Nem sempre o arranjo físico é igual ao DBF, como pode ser visto na Figura 3.4. O sistema apresentado possui um tanque que demanda do volume correspondente ao trabalho contínuo das três bombas apresentadas. Elas estão arranjadas fisicamente em paralelo, entretanto possuem um arranjo de



confiabilidade em série. As setas apresentadas na figura representam apenas a conexão entre os blocos.

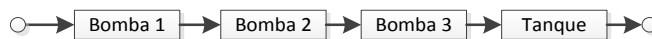
Figura 3.4: Arranjo físico x arranjo de confiabilidade



Fonte: Própria (2017).

Esse arranjo de blocos influencia diretamente os cálculos probabilísticos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade e, portanto, devem ser construídos corretamente. A seguir está apresentada a forma de cálculo da confiabilidade resultante de um sistema com um arranjo simples e outro em paralelo:

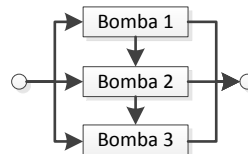
- Arranjo Simples



$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot R_4(t)$$

Vale destacar que nessa configuração a confiabilidade do sistema nunca será maior que a menor confiabilidade individual de um bloco.

- Arranjo Paralelo



$$R(t) = 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot (1 - R_3)]$$

Por outro lado, na configuração paralelo a confiabilidade resultante do sistema sempre será maior que a maior confiabilidade individual de um bloco.

### 3.2.4 Coleta de Dados de Falha e de Manutenção

A maioria das grandes organizações possuem inúmeros registros dos seus ativos, mas nem todos são confiáveis ou não possuem a qualidade necessária para uma análise RAM. Essa etapa é uma das mais importantes e que gastará maior energia da equipe de trabalho

Em alguns casos, um modo de falha pode ter diferentes nomes em diferentes relatórios o que pode dificultar o entendimento dos dados de falha (Calixto, 2016). Essa é uma preocupação necessária, pois a qualidade e confiabilidade dos registros estão diretamente ligadas com a qualidade e confiabilidade da análise RAM, podendo em diversos casos restringir o estudo. Isso pode ser exemplificado abaixo em que um registro de falha é feito de duas formas:

- Exemplo 1: como o registro foi feito: Ponte rolante falhou por problema mecânico, sendo reparada e liberada;
- Exemplo 2: como o registro deveria ser feito: Rolamento do lado acionamento do redutor de translação da ponte rolante travou, acarretando na paralisação da ponte e consequente produção da unidade 01. O rolamento foi trocado. O equipamento ficou parado por 2h e 42 minutos.

O nível de detalhamento do registro no segundo exemplo permite identificar qual o problema ocorrido, a causa do problema, a ação de controle realizada, o tempo de parada e a manutenção. Além disso, informa o local da falha no Menor Nível Manutenível (MNM), do inglês *Lowest Replacement Unit* (LRU).

Dentro da ArcelorMittal Tubarão as fontes a serem utilizadas para obtenção desses registros são o Boletim de Produção, relatórios de turno disponíveis nos CMMS, relatórios de análise de falhas, relatórios semanais, informações de fabricantes e entrevistas de confiabilidades com especialistas.

A entrevista de confiabilidade realizada com especialistas é uma ferramenta que traz bom resultados. Segundo Sallak et al (2015) existem três principais etapas a serem seguidos para essa entrevista:

- Preparação: escolher os especialistas e definir as questões;
- Elicitação: realizar a entrevista;
- Avaliação: verificação dos dados obtidos.

Essas etapas precisam de uma antecipada análise e planejamento para sucesso na obtenção das informações. A obtenção dos registros em um nível de detalhamento e qualidade adequados demandará de menos tempo para análise, menos recursos envolvidos além de permitir a obtenção de resultados mais rápidos.

### 3.2.5 Modelamento das Curvas de Vida e de Reparo

A etapa consiste em identificar a Função Densidade Probabilidade – FDP (do inglês *Probability Density Function – PDF*) para os registros de falha e de reparo para cada bloco definido no DBF com base em todos os registros coletados na etapa anterior.

Cada bloco deverá possuir a curva de vida e de reparo. Na ArcelorMittal Tubarão a obtenção dessas curvas será realizadas através do Software Weibull ++ 11 que permite ganhar tempo com os cálculos e simulações.

As principais distribuições estatísticas usadas nesse estudo de confiabilidade são:

- Exponencial;
- Gama;
- Gama Generalizada;
- Lognormal;
- Normal;
- Weibull.

Identificada as distribuições de cada bloco, a próxima etapa consiste em simular esses dados com um sistema único para obter os resultados desejados.

### 3.2.6 Simulação do Sistema

A simulação presente em softwares computacionais permite determinar as Disponibilidades dos Sistemas através dos cálculos de Confiabilidade e Manutenibilidade com agilidade. Segundo Pallerosi (2007), a simulação é baseada no método de Monte Carlo que consiste em gerar durações até falhas aleatórias

para cada distribuição de falha dos componentes do sistema. O método de simulação não é objeto de estudo desse trabalho.

São vários os benefícios alcançáveis no final dessa etapa, tais como:

- Identificar os componentes mais críticos do sistema;
- Definir os sobressalentes críticos e otimizar estoques;
- Determinar o MTBF e MTTR;
- Avaliar diferentes estratégias de manutenção;
- Avaliar diferentes leiautes do sistema;
- Direcionar análise de ciclo de vida de ativos;
- Determinar frequências de falha;

É importante salientar que os resultados desejáveis devem ser definidos no objetivo da análise e dependerá dos registros disponíveis.

### 3.2.7 Análise dos Resultados e Proposição de Melhorias

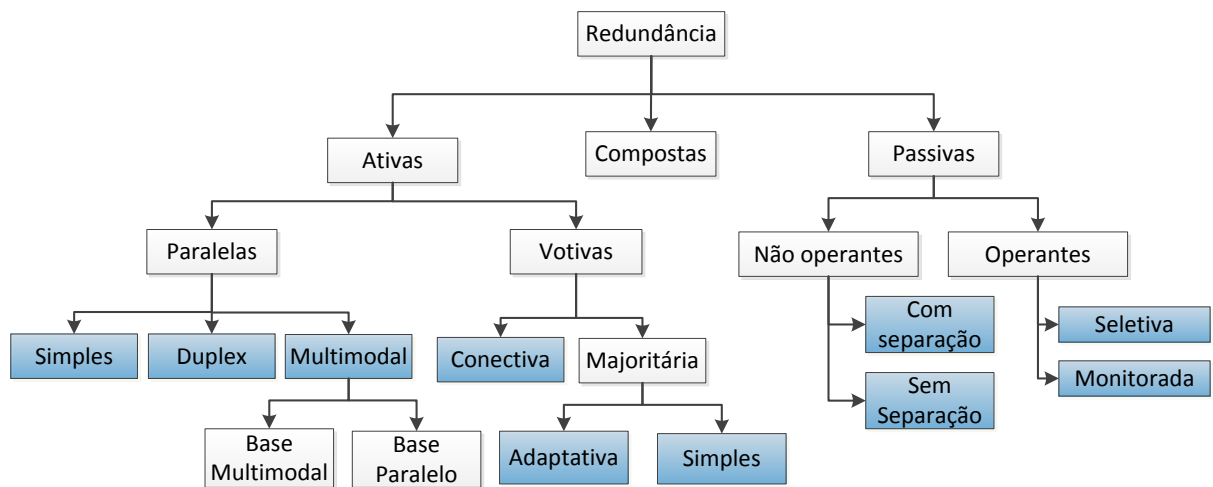
De posse dos resultados, é necessário analisá-los para identificar quais são as ações de controle necessárias para alcance do objetivo da análise. É importante separar as ações relacionadas a confiabilidade e a manutenibilidade.

É importante destacar que a confiabilidade requerida é um atributo de projeto, devendo ser definida nesta fase de desenvolvimento (Gulati, 2013). Esse atributo terá seu valor máximo durante sua vida operacional, não sendo possível aumentá-la. Uma das formas de aumentar a confiabilidade de um sistema é substituir um componente de baixa confiabilidade por um de maior confiabilidade, isto é, reprojutando o sistema.

Ela pode ser medida pelo Tempo Médio Entre Falhas (TMEF), do inglês *Mean Time Between Failure* (MTBF), sendo calculada com o somatório de todos os tempos de operação dividido pelo número total de falhas do sistema.

Outra forma de aumentar a confiabilidade do sistema é inserindo componentes redundantes. Existem diferentes formas de instalar redundâncias nos sistemas. De acordo com Pallerози (2007) as redundâncias podem classificadas em dez diferentes tipos, conforme destacadas em azul na Figura 3.5.

Figura 3.5: Classificação de redundâncias (adaptado de Pallerosi, 2007 )



Fonte: Adaptado de Pallerosi (2017).

Importante é analisar adequadamente o resultado da simulação realizada no sistema e identificar quais tipos de redundâncias são técnica e economicamente viáveis para o cenário.

A manutenção, como o próprio nome diz, é responsável por manter os componentes, isto é, retornar a confiabilidade para o valor máximo definido no projeto. A manutenibilidade pode ser medida pelo Tempo Médio Para Falhar (TMPF), do inglês *Mean Time To Repair* (MTTR), sendo calculada com a somatória de todos os tempos de reparo dividido pelo número de reparos realizados no sistema.

O resultado da manutenibilidade obtida da simulação permite direcionar esforços de forma objetiva para melhorar a performance do ativo, viabilizando os patamares de disponibilidade desejados do negócio.

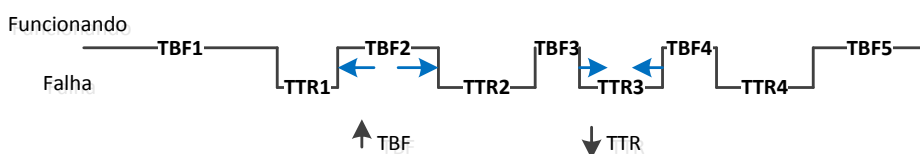
Para isso, diversas ações podem ser implementadas, tais como melhorar a logística de sobressalentes e recursos utilizados, aumentar a capacidade técnica dos mantenedores através de treinamento, melhorar o ferramental utilizado em novas tecnologias, revisar projetos visando otimizar tempos de manutenção, elaborar ou revisar procedimentos de manutenção, dentre outros.

A disponibilidade é uma relação entre manutenibilidade e confiabilidade e pode ser calculada através da equação abaixo:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

O grande desafio é identificar quais ações serão implementadas para melhorar a confiabilidade e a manutenibilidade que viabilizará uma maior disponibilidade.

Figura 3.6: *Time To Repair e Time Between Failure*



Fonte: Própria (2017).

Nessa análise deve ser considerado o cenário técnico e econômico, pois melhorar de mais a confiabilidade e manutenibilidade, pode elevar os custos, inviabilizando as adequações. Nesse contexto a Figura 3.6 busca ilustrar o que deve ser feito para aumentar a disponibilidade, isto é, reduzindo o *Time To Repair* (TTR) e aumentando o *Time Between Failure* (TBF).

### 3.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta alguns conceitos essenciais para Análise RAM, além de detalhar todos os passos definidos na Figura 1.3. Esse detalhamento permite entender as etapas a serem seguidas, bem com algumas dificuldades a serem enfrentadas ao longo do desenvolvimento do estudo. Esse modelo proposto poderá ser aplicado em diferentes sistemas dos processos produtivos siderúrgicos. Isso pode demandar ajustes de acordo com a aplicação que deverá ser avaliada pelo responsável da análise. Entretanto não deve fugir da essência proposta em cada uma dessas etapas.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Nesse capítulo serão mostradas as etapas que devem ser desenvolvidas, seguindo uma sequência cronológica, visando garantir o correto desenvolvimento do trabalho e obtenção dos resultados desejados com um estudo de análise RAM.

### 4.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO

Para escolha do escopo a ser aplicado foi avaliado diferentes fontes de dados. Uma delas foi o boletim de produção que registra os dados de em que o equipamento estava disponível para produzir bem como os dados gerais que impactaram a produção prevista.

Outra fonte utilizada foi os dados de registro de anomalias, que possui um detalhamento mais refinado com as causas imediatas das anomalias e tempos de reparos.

Também foi utilizado todo material de gestão da Máquina do Lingotamento Contínuo (MLC) tais como relatórios semanais, mensais, técnicos, de anomalia. Por fim, a entrevista com a equipe técnica da área permitiu direcionar a escolha do equipamento, que foi o Oscilador de Molde.

Toda metodologia definida no capítulo anterior foi aplicada no Sistema Reparável Oscilador do Molde. Dessa forma, a reunião de lançamento do projeto foi customizada e realizada apenas com a equipe envolvida diretamente no trabalho, isto é, engenheiros de confiabilidade, inspetores e assistentes técnicos de confiabilidade, tendo um engenheiro de confiabilidade como patrocinador.

### 4.2 DEFINIÇÃO DOS LIMITES FÍSICOS E FRONTEIRAS DO SISTEMA

A construção e definição dos limites físico do Oscilador foram realizadas seguindo as seguintes etapas:

- Visita em campo para conhecimento do equipamento;
- Avaliação de desenhos técnicos e manuais;
- Conversa com equipe técnica;
- Construção do Diagrama de Blocos Funcional (DBF);

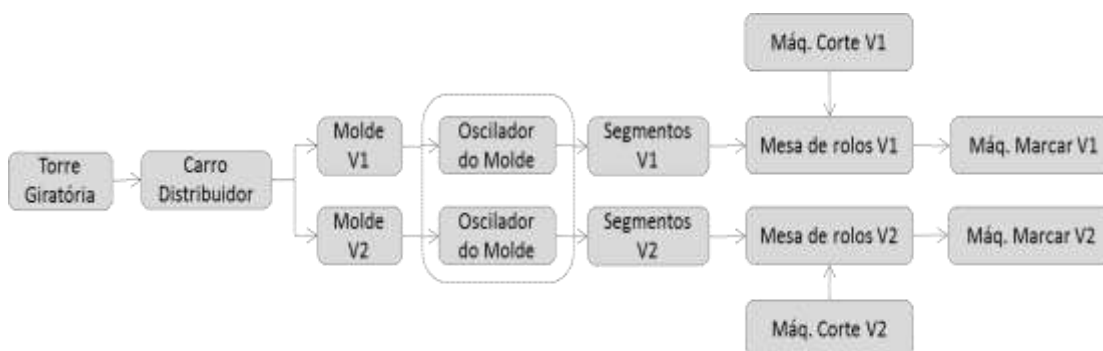
- Validação do DBF com equipe da área;

Para o oscilador foi realizada uma visita com o equipamento em operação e outra em uma parada de manutenção. Durante a primeira visita de campo foi possível entender a função do oscilador, seu arranjo físico e sua relação com os outros componentes da MLC.

O oscilador está instalado por debaixo do molde da MLC, numa posição de difícil acesso e visualização. Para isso foi necessário a segunda visita com o equipamento parado, permitindo detalhar o conhecimento do equipamento, visualizando seus componentes, bem como requisitos de manutenibilidade aplicáveis.

O detalhamento da análise dos desenhos e manuais permitiu entender tecnicamente seu funcionamento e interfaces existentes permitindo construir o DBF. A Figura 4.1 apresenta o DBF da MLC.

Figura 4.1: DBF da MLC

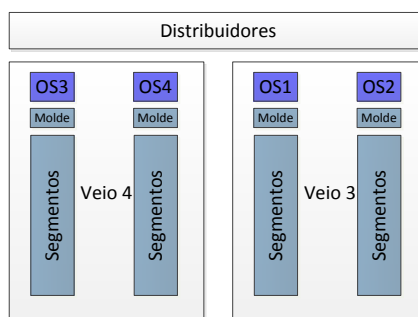


Fonte: Própria (2017).

A Figura 4.2 apresenta esquematicamente como os quatro Osciladores (OS) estão presentes dentro dos veios de laminação.



Figura 4.2: Posição dos Osciladores na MLC

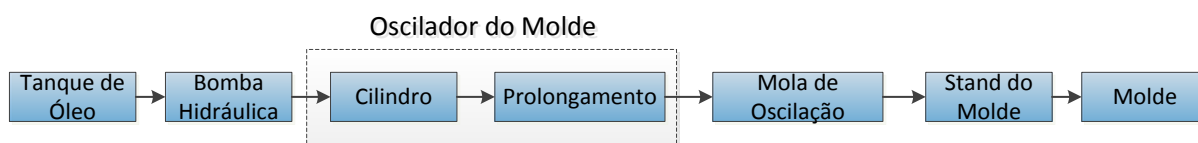


Fonte: Própria (2017).

Cada oscilador é considerado um Sistema reparável, formado por diversos componentes organizados para que executem a função desejada. Dentre os diversos componentes, o Servo-Cilindro (também chamado de Cilindro Hidráulico de Oscilação) e o Prolongamento da Haste caracterizam esse sistema como reparável. O Servo-cilindro possui diversas subunidades que, em caso de falha, levam a troca completa do cilindro.

Dessa forma, o Sistema Oscilador de Molde considerado como escopo desse trabalho é formado apenas por esses dois componentes que estão organizados conforme mostrado no DBF da Figura 4.3 dentro da região delimitada pelo retângulo pontilhado.

Figura 4.3: Diagrama de Blocos Funcional

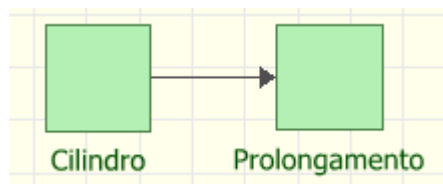


Fonte: Própria (2017).

#### 4.3 DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONFIABILIDADE

Foi utilizado o software Weibull ++ e o BlockSim ++ da Reliasoft para desenvolvimento dos cálculos e simulações de confiabilidade. O Diagrama de Blocos de Confiabilidade foi construído dentro do BlockSim++ e mostrado conforme Figura 4.4.

Figura 4.4: Diagrama de Blocos de Confiabilidade



Fonte: Reliasoft (2017).

Os dois componentes estão organizados em série dentro do estudo de confiabilidade, isto é, na falha de qualquer um dos componentes o sistema também falhará.

#### 4.4 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi a etapa mais dispendiosa em todo trabalho desenvolvido e gerou algumas oportunidades que serão apresentadas mais adiante. Essa etapa começou com a identificação das diferentes fontes de informação disponíveis e todos os respectivos responsáveis por elas conforme apresentado na Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Fontes de Registro de Falhas

FONTE DO INFORMAÇÃO	RESPONSÁVEL
Relatório de Anomalias (falhas)	Equipe de Turno e inspetor
Relatório Semanal	Inspetor e Assistente Técnico
Relatório de Produção	Operação e Unidade Técnica
Relatório de Manutenção	Engenheiro de Confiabilidade
Histórico de Ordens de Serviço	Inspetor, Assistente Técnico e Engenheiro de Confiabilidade
Entrevista de Confiabilidade	Inspetor, Assistente Técnico e Engenheiro de Confiabilidade, Operação, Unidade Técnica

Fonte: Própria (2017).

Os primeiros dados analisados foram os gerados dos relatórios de anomalias. O destaque desse relatório foi o grande número de registros disponíveis.

Entretanto, uma parcela muito pequenas dos registros puderam ser utilizados. Segue abaixo os problemas identificados nesse relatório:

- Registro de falha em nível hierárquico que não permitiu identificar o LRU;
- Registro sem permitir se o item estava em falha;
- Registro de falha incompleto. Ex.: falha mecânica, falha elétrica, etc;
- Registro de falha sem dados de tempos de falha e tempos de reparo;
- Registros de falhas sem detalhar se o item foi reparado ou substituído;

Outra fonte de informação foi o relatório semanal que focava em falhas mais relevantes. No caso das falhas mais importantes, os registros apresentavam maior qualidade com possibilidade de utilização para simulação. No entanto esse relatório não contemplava todas as falhas ocorridas no equipamento, sendo uma importante fonte de detalhamento de informação, mas incompleta no ponto de vista de falhas como um todo.

Outro relatório explorado foi o Boletim de Produção que consolida todas as ocorrências de natureza operacional, manutenção e outras que influenciam na produção. Desse relatório foi possível obter registros de falhas que não tinham sido identificadas em nenhuma das outras fontes até então estudadas.

Esses registros são feitos de forma genérica, codificado de acordo com o padrão estabelecido pela equipe de produção como mostrado na Quadro 4.2, necessitando maior detalhamento com a equipe de trabalho envolvida.

Quadro 4.2: Exemplo de registro de parada

Local	Início	Fim	Código da Parada
Continuo 2	01/01/2017 00:22	01/01/2017 00:30	LP
Continuo 2	01/01/2017 01:22	01/01/2017 01:29	M4
Continuo 2	01/01/2017 02:24	01/01/2017 02:31	MX

Fonte: Própria (2017).

Esse relatório foi muito útil para avaliações em níveis mais elevados, isto é, quando não se deseja aprofundar nos níveis de falhas dos componentes e seus modos de falha.

Também foi observado nesse relatório que existem vários registros de paradas de produção que são computadas para processos produtivos que precedem

o Lingotamento Contínuo, como por exemplo, problema de baixo sal de gusa na Aciaria e Alto Forno pode gerar uma parada por oportunidade na MLC para correção de falhas. Entretanto, essas falhas não são registradas na MLC.

Isso acontece pelo processo de produção do aço na ArcelorMittal Tubarão ser integrado e sequenciado. Nesse caso não é possível identificar se nesse período em que o equipamento esteve parado existiam falhas em componentes da MLC e se foram mantidos.

O Histórico de ordens de serviços possuía dados de todas as intervenções realizadas nos ativos, sendo necessário estratificá-los de acordo com o objetivo do estudo. Também foi identificado nesse tipo de registro os mesmos problemas identificados nos registros do Relatório de Anomalias.

Até essa etapa, os registros obtidos eram de baixa qualidade, colocando em risco o estudo. Por fim, foram realizadas algumas entrevistas com a equipe de manutenção e confiabilidade do equipamento com objetivo geral de melhorar a qualidade e detalhar melhor os registros.

Essa ferramenta de entrevista se demonstrou necessária para viabilizar a utilização do maior número possível de registro, bem como conhecer melhor o comportamento de falha do oscilador.

O Quadro 4.3 mostra um exemplo do resultado final da coleta de dados de falhas do oscilador de molde.

Quadro 4.3: Dados consolidados de falhas

Data	BLOCO	ITEM FUNCIONAL	TEMPO DE REPARO TTR (min)	F/S	Tempo até Falha TTF (min)	TTR(H)	TTF (H)	Fonte	Registro
23/9/14 12:00 PM	VEIO 03	Prolongamentos da Hastes dos Cilindros 1	240	S	239.904	4,0	3.998	OS	0440.2014.11.0144
5/6/15 10:37 PM	VEIO 03	Prolongamentos da Hastes dos Cilindros 1	180	F	367.657	3,0	6.128	REAM	0405-2015-1778
15/10/15 12:00 AM	VEIO 03	Prolongamentos da Hastes dos Cilindros 1	180	F	188.543	3,0	3.142	OS	0440.2015.43.0060
13/11/15 12:00 AM	VEIO 03	Prolongamentos da Hastes dos Cilindros 1	240	S	41.520	4,0	692	OS	0440.2015.34.0034
4/10/16 12:00 AM	VEIO 03	Prolongamentos da Hastes dos Cilindros 1	240	S	469.200	4,0	7.820	OS	0440.2016.40.0021

Fonte: Própria (2017).

Foi construído um quadro desses para cada componente não reparável do sistema reparável. Todos esses dados foram utilizados para modelar as curvas de vidas e de manutenibilidade dos ativos.

## 4.5 MODELAR DADOS

O objetivo desse capítulo foi modelar as curvas de vida dos componentes através dos dados obtidos. Para esse modelamento foi utilizado o Software Weibull ++ versão 11 da Reliasoft. O primeiro passo dessa fase foi carregar todos os registros no software, sem realizar qualquer avaliação inicial.

A etapa seguinte foi avaliar se o modelo gerado estava coerente com os dados, etapa que pode ser chamada de estimativa de parâmetros. Nessas condições todos os dois componentes foram modelados com os resultados das funções de probabilidades de falha que seguem.

### 4.5.1 Servo Cilindro de Oscilação

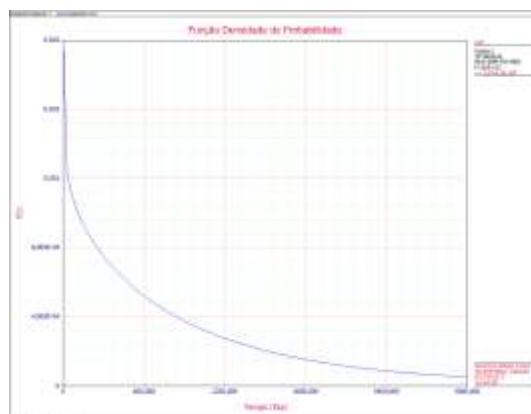
Através do modelamento foram obtidas as informações de confiabilidade e de manutenibilidade do servo oscilador, que seguem.

#### 4.5.1.1 Análise de Confiabilidade

Várias distribuições foram testadas, sendo a Weibull dois parâmetros a que melhor se ajustou aos dados (Figura 4.5). O elevado valor de verossimilhança maior do que os valores obtidos para outras distribuições avaliadas, sugerindo que o modelo está ajustado à amostra.

Figura 4.5: Modelo do Cilindro

Parâmetros	
Distribuição:	Weibull-2P
Análises:	MLE
Método do IC:	FM
Ranqueando:	MED
Beta	0,92
Eta (h)	22844,94
Valor da LK	-65,57
F \ S	6 \ 22
LOCAL VAR/ COV MATRIX	
Var-Beta=0,094711	Var-Eta Beta=-3027,06736
Eta Beta=-3027,06	Var-Eta=1,997739E+08



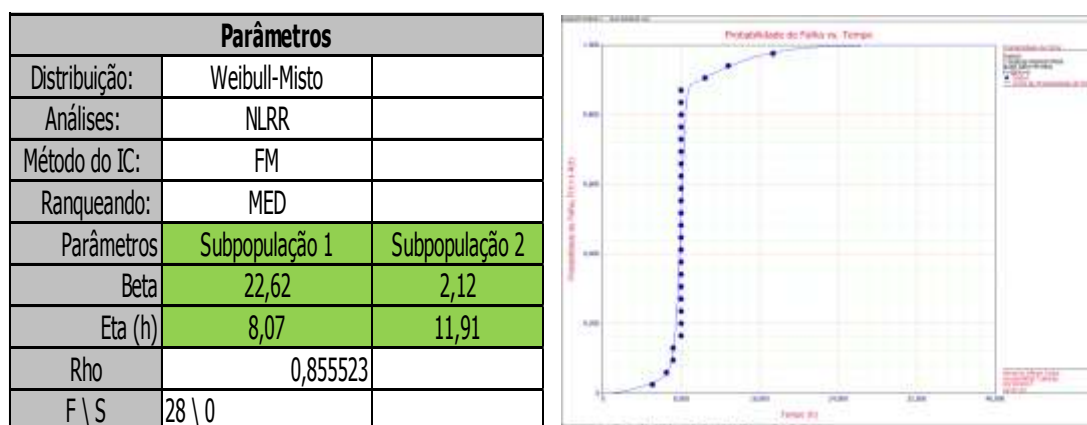
Fonte: Reliasoft (2017).

O valor de  $\beta$  menor que 1 representa possíveis problemas de montagem ou projeto (mortalidade infantil), coerente com a realidade vivenciada na área. Através da entrevista de confiabilidade foi possível identificar que os registros de falhas estão atrelados a problemas de montagem de conexão de alimentação e problemas de fabricação da haste do cilindro que é um subitem do servo cilindro.

#### 4.5.1.2 Análise de Manutenibilidade

A distribuição que melhor se ajustou aos dados de manutenibilidade do Cilindro foi a Weibull mista de duas subpopulações (Figura 4.6). Nesse caso em que foi utilizado a Regressão do Ranque Não Linear o valor de correlação de 0,85 (próximo de 1) valida o modelo utilizado.

Figura 4.6: Função de manutenibilidade do cilindro



Fonte: Reliasoft (2017).

Para as duas subpopulações o valor de  $\beta$  maior que 1 representa uma taxa de manutenibilidade crescente, isto é, o número de reparos realizado no período de tempo está crescente. Isso pode ser reflexo de aumento de maturidade da equipe de manutenção, melhora nos procedimentos de reparo, melhora de ferramentas, melhora de logística, dentre outros.

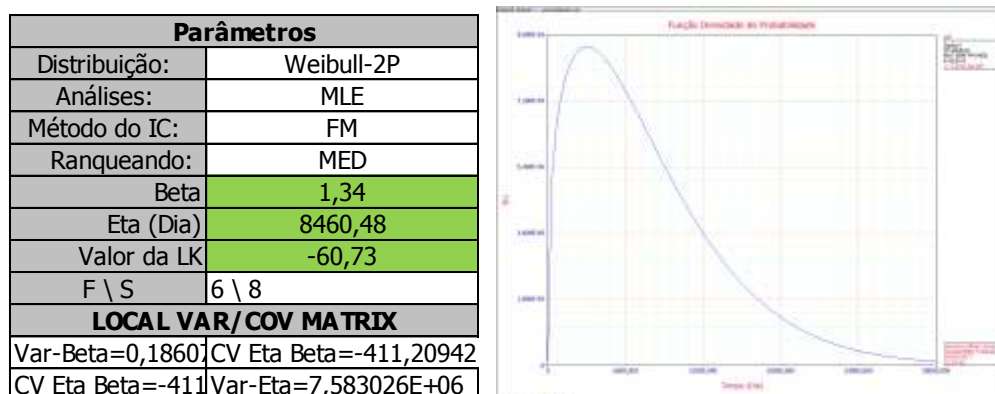
#### 4.5.2 Prolongador da Haste

Através do modelamento foram obtidas as informações de confiabilidade e de manutenibilidade do prolongador da haste, que seguem.

##### 4.5.2.1 Análise de Confiabilidade

A distribuição que melhor se ajustou aos registros de falha do prolongamento da haste foi a weibull dois parâmetros com um valor de verossimilhança maior que as distribuições avaliadas, que representa boa aderência (Figura 4.7).

Figura 4.7. Função densidade probabilidade do prolongamento



Fonte: Reliasoft (2017).

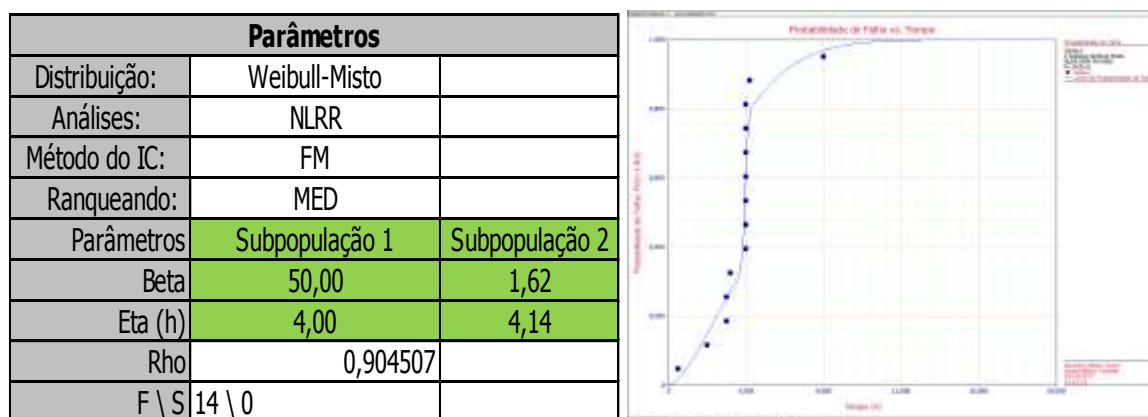
O valor de  $\beta$  maior que 1 representa caracteriza mortalidade senil, típico de processos de deformação e desgaste. Mais uma vez a entrevista de confiabilidade permitiu identificar que um dos principais modos de falha desse componente é a atrelado a fadiga, que sugere boa aderência da amostra com o modelo proposto.

##### 4.5.2.2 Análise de Manutenibilidade

Para manutenibilidade foi escolhido a distribuição de weibull mista de duas subpopulações. Também foi utilizado a Regressão do Ranque Não Linear obtendo-se um valor de correlação de 0,90 (próximo de 1) valida o modelo utilizado (Figura 4.8). Os valores de  $\beta$  das duas subpopulações foram maior que 1, que representa

uma taxa de manutenibilidade crescente, isto é, o número de reparos realizado no período de tempo está crescente.

Figura 4.8: Função de Manutenibilidade da Haste



Fonte: Reliasoft (2017).

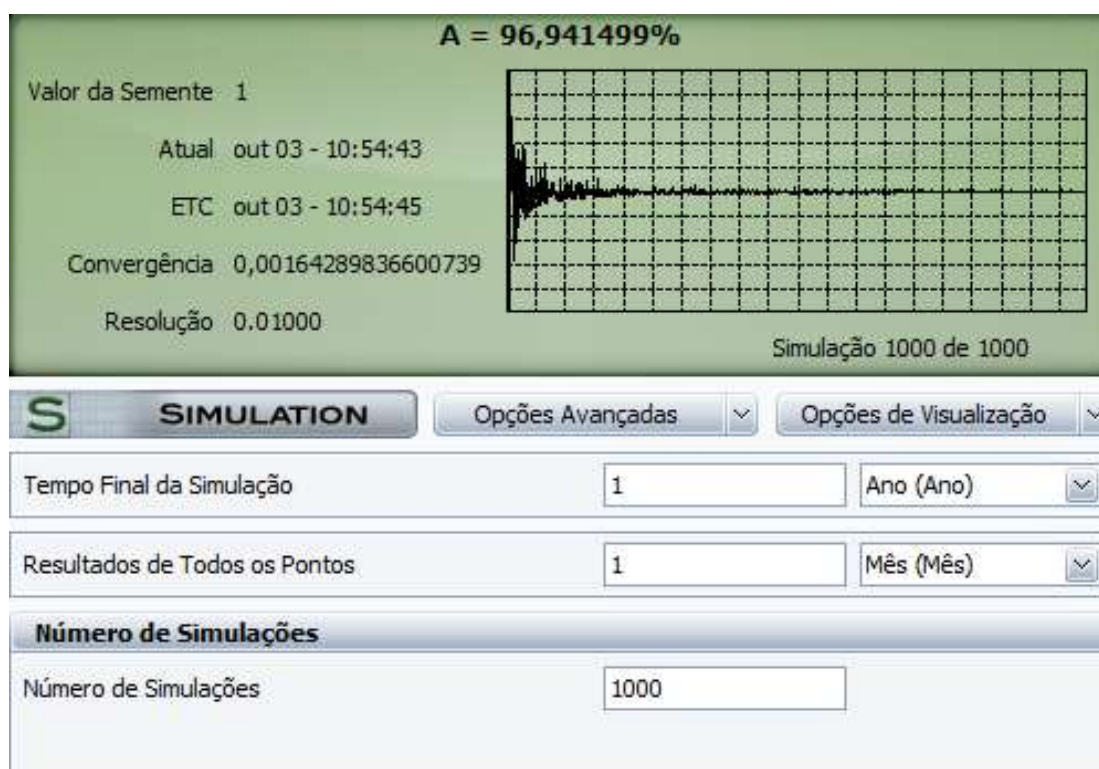
Conforme avaliado com a equipe da área, a equipe que realiza a manutenção do cilindro é a mesmo do prolongamento e a análise de manutenibilidade dos dois componentes mostraram valores de  $\beta$  maiores que 1, sugerindo que efetivamente são similares.

#### 4.6 SIMULAR: ANÁLISE RAM DO SISTEMA

As funções densidade probabilidades (pdf) obtidas durante o modelamento foram publicadas no Weibull ++ para que pudessem ser utilizadas nas análises no Blocksim ++. Para cada bloco definido durante a criação do DBF foi carregado uma pdf de confiabilidade e outra de manutenibilidade. Depois disso foram realizadas mil simulações obtendo resultado conforme apresentado na Figura 4.9 para análise RAM. Nessa primeira simulação não foi consideradas paradas preventivas nem disponibilidade de sobressalentes.



Figura 4.9: Resultado da simulação sem preventiva



Fonte: Reliasoft (2017).

A disponibilidade do sistema para 1 ano de uso é de 96,9%. Os resultados detalhados dessa análise, serão abordados no capítulo 5.

## 4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O uso das ferramentas de Engenharia de Confiabilidade Quantitativa tal como a Análise RAM permite desenvolver uma avaliação profunda sobre os sistemas, suportado por um modelamento matemático robusto. A seguir estão apresentados e analisados os resultados obtidos dessa análise.

### 4.7.1 Grau de Importância de confiabilidade por bloco

Optou-se nessa fase de análise, avaliar apenas a confiabilidade do sistema no módulo analítico. O primeiro passo foi calcular a sua confiabilidade um ano, que

está apresentado na Figura 4.10. É possível observa que a  $R_{s(t)}=20,94\%$ , que pode ser considerado um baixo valor para um sistema crítico.

Figura 4.10: Confiabilidade do sistema

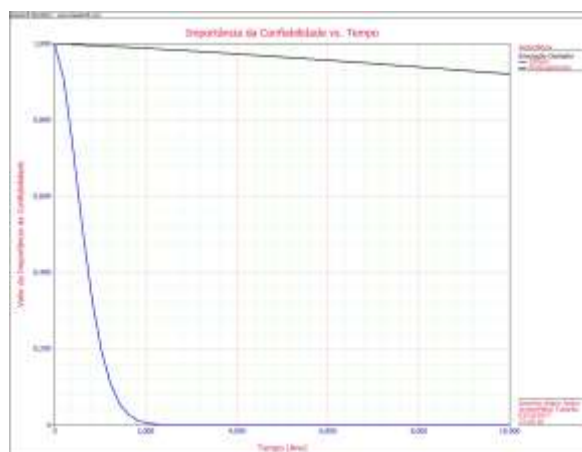
<b>Entrada do Usuário</b>		
Tempo Final da Missão (Ano) (Ano) =	1	
<b>Saídas dos Blocos</b>		
Nome do Bloco	Confiabilidade	Prob. de Falha
Cilindro	99,53%	0,47%
Prolongamento	21,04%	0,79
<b>Saída do QCP</b>		
	Confiabilidade	Prob. de Falha
Sistema	20,94%	79,06%

Fonte: Reliasoft (2017).

Na sequência, foi identificado o grau de importância de confiabilidade de cada bloco do sistema para o ciclo de um ano. Essa etapa é importante, pois permite identificar qual dos blocos possui maior influência sobre a confiabilidade do sistema.

A Figura 4.11 mostra o grau de importância de confiabilidade de cada bloco ao longo do tempo. É possível destacar que o prolongamento da haste sempre será o bloco com maior índice de importância de confiabilidade. Isso nem sempre é observado para sistemas em geral. Existem casos que os blocos com maior grau de importância variam ao longo do tempo.

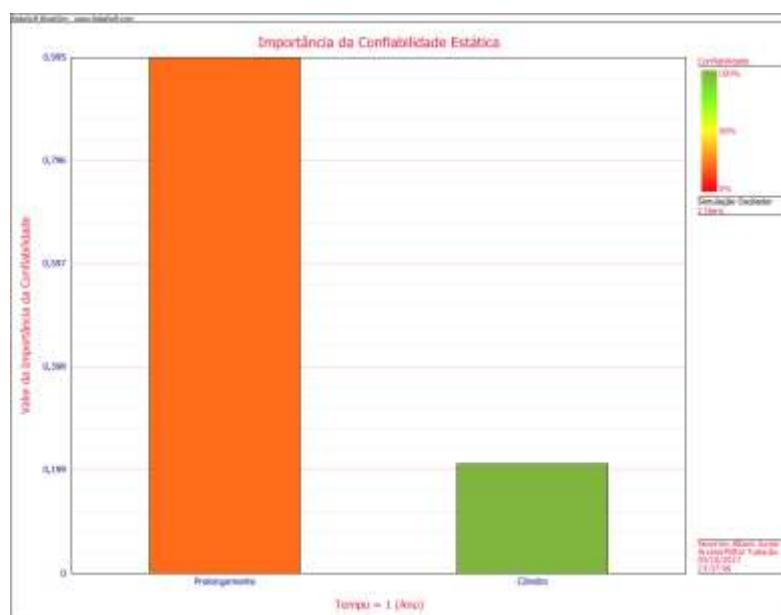
Figura 4.11: Importância de Confiabilidade



Fonte: Reliasoft (2017).

A Figura 4.12 mostra o valor de importância de confiabilidade para o ciclo de um ano.

Figura 4.12 Importância de Confiabilidade



Fonte: Reliasoft (2017).

Considerando a necessidade de aumentar a confiabilidade desse sistema, é indicado começar estudos para aumentar a confiabilidade do prolongamento do oscilador do molde por ter o maior índice (99,5%).

#### 4.7.2 Análise de alocação

A Análise de alocação permite identificar a confiabilidade necessária para cada componente com relação a confiabilidade desejada para o sistema. Nesse estudo está foi considerado uma confiabilidade desejada de 85% para um ano.

Quadro 4.4: Resultado da análise de alocação

Simulação Oscilador (Igual)				
Nome do Bloco	IC	Confiabilidade	Confiabilidade Desejada	Unidades em Paralelo Equivalentes *
Prolongamento	0,995259	0,210415	0,921955	10,8
Cilindro	0,210415	0,995259	0,921955	0,5

Resultados do Sistema		
Confiabilidade	Confiabilidade Desejada	Unidades
0,209417	0,850001	Ano

\* Unidades em Paralelo Equivalentes: Número de Unidades Paralelas Equivalentes Indica o número de Blocos requeridos na em paralelo com este Bloco particular, ao invés de aumentar a Confiabilidade do Bloco

Fonte: Reliasoft] (2017).

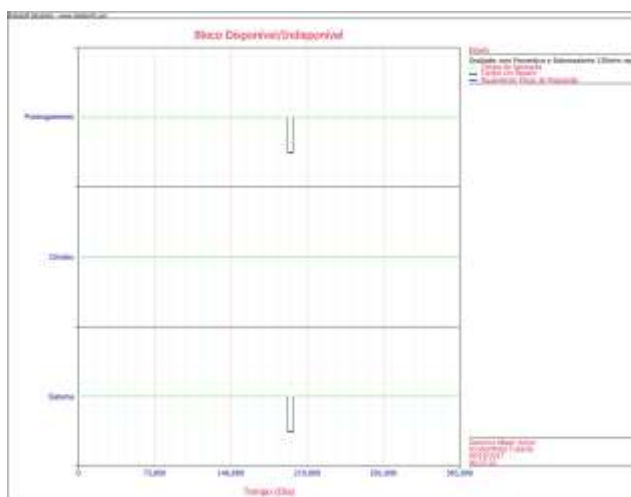
O Quadro 4.4 apresenta os resultados dessa análise e é possível destacar que, para a jornada de tempo especificada, o prolongamento precisaria de 11 unidades em paralelo para alcançar à confiabilidade desejada do sistema. Na configuração física isso não é possível, sendo necessário avaliar adequações no projeto para obter o resultado desejado.

O cilindro possui confiabilidade próxima de 100%, acima da desejada para o sistema. Portanto, não se justifica nenhuma ação de melhora de confiabilidade no cilindro.

#### 4.7.3 Análise dos blocos durante a falha

Considerado que todo bloco para de operar quando o sistema está em falha, os componentes não acumulam tempo de vida quando o sistema está fora de operação. Isso pode ser observado na Figura 4.13 para o ciclo de um ano de operação. A única falha observada no período de análise está entre 200 e 205 horas.

Figura 4.13: Tempo do sistema fora de operação



Fonte: Reliasoft (2017).

#### 4.7.4 Análise da disponibilidade do sistema

A disponibilidade média obtida para esse sistema foi de 96,9% (Figura 4.8), que pode ser considerada elevada, mesmo com a confiabilidade do sistema em 20,2% ( $R_{s(t)}=20,2\%$ ), como pode ser visto na Quadro 4.5.

Quadro 4.5: Disponibilidade do sistema.

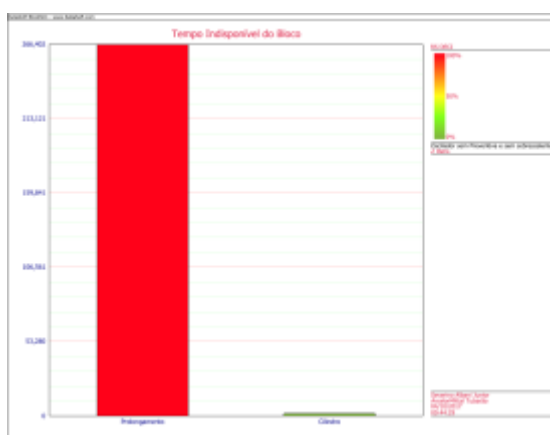
<b>Visão Geral do Sistema</b>	
<b>Geral</b>	
Disponibilidade Média (Todos Eventos):	96,94%
Desvio Padrão (Disponibilidade Média):	2,34%
Disponibilidade Média (sem MP, OC e Inspeção):	96,94%
Disponibilidade Pontual (Todos Eventos) em 8760:	96,00%
Confiabilidade(8760):	20,20%
Quantidade Esperada de Falhas:	1,09
Desvio Padrão (Quantidade de Falhas):	0,75
TMAPF (h):	6920,18
MTBF (Tempo Total) (h):	8066,30
MTBF (Tempo de Funcionamento) (h):	7819,6
MTBE (Tempo Total) (h):	8066,3
MTBE (Tempo de Funcionamento) (h):	7819,6
<b>Tempo Disponível/Indisponível do Sistema</b>	
Tempo Disponível (h):	8492,1
Tempo Indisponível da MC (h):	267,9
Tempo Indisponível da Inspeção (h):	0,0
Tempo Indisponível MP (h):	0,0
Tempo Indisponível da OC (h):	0,0
Tempo Indisponível Total (h):	267,9
<b>Eventos com Parada do Sistema</b>	
Número de Falhas:	1,1
Quantidade de MCs:	1,1
Quantidade de Inspeções:	0,0
Quantidade de MPs:	0,0
Quantidade de OCs:	0,0
Quantidade de Eventos OFF por Gatilho:	0,0
Total de Eventos:	1,1

Fonte: Reliasoft (2017).

Esse Quadro também mostra que a quantidade de falha esperada para esse sistema no período avaliado é de 1,1 falhas e que o tempo médio até a primeira falha será de aproximadamente 288 dias (6920h). O Tempo médio entre falhas (MTBF) é de 336 dias e o tempo indisponível desse sistema será de aproximadamente 11,2 dias (268h).

Outra análise feita foi o tempo indisponível de cada bloco (Figura 4.14) que apresenta o prolongamento como bloco mais indisponível (264h). Além da melhora na confiabilidade já vista nos capítulos anteriores, é necessário melhorar sua manutenibilidade. Para isso é preciso verificar dentre outras coisas, se as melhores ferramentas estão disponíveis para executar seu reparo, se os sobressalentes estão disponíveis nos locais mais apropriados, se o time está devidamente treinado, se existe um bom padrão de execução da atividade.

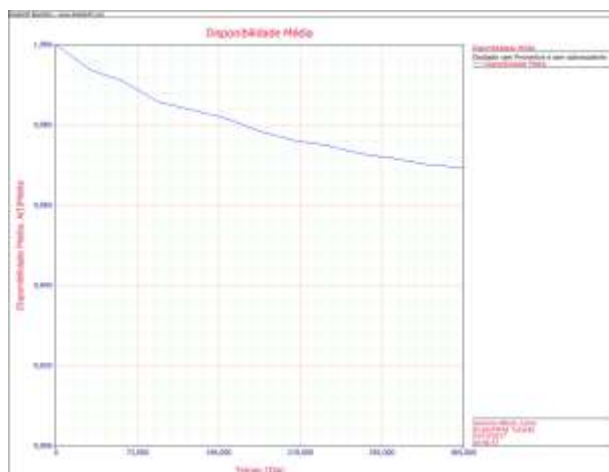
Figura 4.14: Tempo indisponível dos blocos



Fonte: Reliasoft (2017).

Considerando uma disponibilidade média desejada para o sistema em 98%, é possível observar na Figura 4.15 que isso somente seria possível até próximo do 168º dia.

Figura 4.15: Disponibilidade média do sistema



Fonte: Reliasoft (2017).

#### 4.7.5 Propostas de Melhorias

Foi possível observar que a o prolongamento possui baixa confiabilidade e manutenibilidade, enquanto servo-cilindro possui alta confiabilidade. Para ambos os blocos foram avaliados os possíveis modos de falhas presentes, permitindo definir ações de controles.

Vale destacar que dentre os objetivos desse estudo está a busca da melhora da disponibilidade do oscilador e desenvolver uma metodologia que possa ser aplicada em diversos sistemas dentro da usina. Portanto, as ações propostas foram segregadas em dois blocos: o primeiro relacionado a ações estruturantes a fim de viabilizar e otimizar o desenvolvimento de análise RAM dentro da usina (Quadro 4.6). Por fim, propor ações para melhorar a disponibilidade do Sistema Oscilador do Molde (Quadro 4.7).

Quadro 4.6: Ações propostas para Análise RAM

Ações estruturantes
Treinar as equipes de turno, inspeção e executantes nos conceitos de confiabilidade (modo de falha, tempo de reparo, tempo entre falhas, etc).
Definir e padronizar os requisitos mínimos para os registros (local da ocorrência, modo de falha, início do reparo, término do reparo, detalhes sobre a intervenção, recuperação, substituição, etc).
Treinar as equipes de turno, inspeção e executantes para realizar registro com qualidade.
Avaliar unificação de plataformas de ocorrências de falhas (Ordem de serviço, relatório de turno, relatório semanal, Boletim de produção).
Realizar análise crítica nos registros feitos para garantir qualidade dos dados.

Fonte: Própria (2017) .

Quadro 4.7: Ações propostas para melhorar a disponibilidade do Oscilador

Ações para melhorar disponibilidade do Oscilador
<b>Prolongamento (Índice de importância = 99,5%)</b>
Revisar projeto do prolongamento com inclusão de dupla rótula para minimizar esforços na haste.
Revisar projeto do prolongamento para minimizar fadiga na região de mudança de seção.
Tornar fixação do prolongamento na haste mais robusta.
Definir e aplicar torque na montagem.
Aplicar conceitos de Confiabilidade Humana nas equipe dos executantes para evitar erros de montagens.
Criar plano de inspeção com líquido penetrante na transição de secção do prolongamento
Criar um plano de verificação de alinhamento através de topografia

Revisar padrão, detalhando procedimento de montagem e cuidados com alinhamento, sequência de aperto.

Disponibilizar um conjunto de sobressalente do prolongador junto a equipe de manutenção da área, minimizando tempos com logística.

### Servo-cilindro (Índice de importância = 21%)

Instalar transmissor de pressão para garantir monitoramento da pressão da linha de comando da servoválvula para permitir histórico e acompanhamento do equipamento/funcionamento.

Disponibilizar um conjunto de sobressalente do cilindro junto a equipe de manutenção da área, minimizando tempos com logística.

Trocar das tubulações rígidas de alimentação do cilindro por mangueiras flexíveis (minimiza tempos de desmontagem).

Instalar sistema para guardar informação (gerar histórico) dos parâmetros de operação do sistema (curva de posição, de força, etc ) para permitir analisar comportamento de funcionamento, agilizando diagnose de problemas.

Fonte: Própria (2017).

Até a conclusão desse trabalho as ações propostas estavam em desdobramento, não sendo possível avaliar os seus benefícios. Esse tema pode ser fruto de estudos futuros.

## 4.8 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi aplicado toda metodologia definida no capítulo três para o oscilador do molde. Apresentando como fazer todas as etapas desde a definição do sistema e suas fronteiras, passando pela coleta e tratamento dos dados para que pudessem ser utilizados durante as análises.

Exemplifica a etapa de modelamento em que são definidas as funções densidade probabilística para os dados de falha e de reparo, com toda análise para definição de qual distribuição mais se adequa e ajusta à amostra utilizada.

Essa etapa é de extrema importância pois permite avaliar os resultados do modelo, verificando com as equipes de área se o modelo representa bem a realidade do sistema em campo e utilizar esse modelo para diversas análises e tomadas de decisão. Eventualmente os resultados das primeiras análises demandam ajustes já que o modelo nem sempre reflete a realidade nas primeiras simulações.



Também apresenta e analisa os resultados obtidos no desenvolvimento de todo trabalho. O próximo capítulo abordará os resultados obtidos dessa análise e as recomendações necessárias para alcançar os objetivos do negócio.

## 5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi proposto etapas para aplicação da Análise RAM no Oscilador do Molde da Máquina de Lingotamento Contínuo, obtendo expressivos resultados como apresentados no capítulo anterior.

Os resultados alcançados nessa análise RAM permitem direcionar ações para obtenção de resultados mais rápidos com menores custos. Como é o caso do Oscilador que, mesmo com disponibilidade do sistema em  $A_{(t)} = 96,94\%$ , permite identificar a baixa confiabilidade do Prolongamento ( $R_{(t)}=20,1\%$ ) e propor ações que poderão melhorar essa confiabilidade e aumentar a disponibilidade.

O valor de MTBF e o tempo indisponível do Sistema mostram uma janela de oportunidade para definir ações que permitam melhorar a produção. Além desses, dá os direcionadores para aumentar a disponibilidade das plantas, sendo um diferencial importante no competitivo mercado mundial do aço. Por ultimo, mas não menos importante, a redução das taxas de falha com a melhora da confiabilidade, expõe a menos riscos o time de manutenção, permitindo melhores resultados de segurança.

Dentre as dificuldades enfrentadas ao longo desse trabalho, a que mais chamou a atenção foi a qualidade dos registros de manutenção do Oscilador do Molde. Muitas vezes os registros estavam incompletos ou difícil de entender, necessitando do envolvimento de mais pessoas que o previsto inicialmente e gastando mais tempo que o previsto. Isso sugere que a baixa qualidade dos registros não esteja ocorrendo apenas com o Oscilador, mas também em outros sistemas dentro da usina, sendo importante buscar uma melhora.

Essa melhora na qualidade dos registros é uma jornada desafiadora que somente será possível com uma mudança de cultura através da disseminação da Engenharia de Confiabilidade para os diferentes níveis da organização. A falta de registros de qualidade pode influenciar negativamente a utilização em massa dessa metodologia.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros poderão explorar os resultados obtidos com a implantação das ações recomendadas. Também poderá explorar a aplicação dessa metodologia em unidades produtivas maiores tal como a Máquina de Lingotamento Contínuo, além de obter outros resultados como tempo ótimo de reparo, lista de sobressalentes críticos. Todos esses resultados permitirão uma visão para todo ciclo de vida do ativo, traçando ações para explorar e obter melhor valor através dos ativos que está totalmente alinhada com os conceitos de Gestão de Ativos da ISO55000.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, Will, **Iron ore and Steel forecast for anlysis for Q2 2016**. Disponível em: < <https://www.fastmarkets.com/base-metals-news/base-metals/iron-ore-steel-forecast-analysis-q2-2016/>>. Acesso em: 10 de abril 2017.
- ARCELORMITTAL TUBARÃO. Banco de imagens, Vitória, 2017
- ARCELORMITTAL TUBARÃO. **Plano Diretor De Manutenção E Gestão De Ativos**. Gerencia de Tecnologia de Manutenção, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia. Norma **ABNT NBR 5462** 1994. Baseada na IEC 50 (191).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão de Ativos – Visão Geral, Princípios e Terminologia: **ABNT NBR ISO 55000**. Rio de Janeiro, 2014.
- BAZOVSKY I, **Reliability Theory and Practice**, Dover Edition, Nova Iorque, 2004 (12)
- CALIXTO, E, **Gas and Oil Reliability Engineering** – Modeling and Analysis, Rio de Janeiro, 2016.
- CORVARO, F, G. Giacchetta, B. Marchetti, M. Recanati, **Reliability, Availability, Mantenability (RAM) study**, on reciprocating compressor API 618, Petroleum 3 (2017) 266 e 272.
- DEDINI Indústria de Base, Equipamentos para Siderurgia, Disponível em: < [http://www.codistil.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=20&Itemid=29&lang=pt](http://www.codistil.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=29&lang=pt) >. Acesso em: 09 de julho 2017.
- GULATI, Ramesh, **Maintenance and Reliability** – Best Practice, 2ª Edição, Nova Iorque, 2013 (152).
- HERDER, P.M. ,J.A. van Luijk, J. Bruijnooge, **Industrial application of RAM modeling Development and implementation of a RAM simulation model for the Lexans plant at GE Industrial**, Plastics, Reliab. Eng. Syst. Saf. 93 (2008) 501 e 508.
- Komal, S.P. Sharma, D. Kumar, **RAM Analysis of repairable industrial systems utilizing uncertain data**, Appl. Soft Comput. 10 (2010) 1208 e 1221.
- LIMA e Zanetti Engenharia e Consultoria Ltda, Disponível em: <<http://www.limaezanette.com/clientes.php>>. Acesso em: 08 de julho 2017.
- MOUBRAY, John, “**Manutenção Centrada em Confiabilidade**”, 4ª Edição, Woburn, MA, Estados Unidos, 1997 (329).
- PALLEROSI, C. A, **Confiabilidade de Sistemas vol.4**, Confiabilidade, a Quarta Dimensão da Qualidade, 2007.

PARDEEPKUMAR, R. Kumar, P. Dahmani, D. Narula, **RAM Analysis of some process industries: A Critical Literature Review**. Int. J. Mech. Eng. Rob. Res. (2014)171e179.

PONTO de Apoio Engenharia e Arquitetura, Companhia Siderúrgica de Tubarão, Máquina do Lingotamento Contínuo 3. Disponível em: <<https://www.pontodeapoio.eng.br/pg-eng-lingotamento-cst>> Acesso em: 08 de julho 2017.

RELIASOFT Corporation. **Plataforma Synthesis**, versão 11.1.3, 2017.

RESPIRA Vitória, Grupo de Trabalho Interinstitucional, Padrões de Qualidade do Ar. Disponível em: < 2017<http://respiravitoria.blogspot.com.br/2013/03/>>. Acesso em: 07 de julho 2017.

SALLAK, M., S. Desterche, W. Schon, F. Vanderhaegen, D. Berdjag, **Uncertainty, elicitation of experts' opinion, and human failures**: Challenges for RAM Analysis of ERTMS SoS. SoSE (2015) 88 e 93.

SHARMA, R.K., S. Kumar, **Performance modelling in critical engineering systems using RAM analysis**, Reliab. Eng. Syst. Saf. 93 (2008) 891e 897.

TYBA Acervo de imagens, Lingotamento Contínuo na Companhia Siderúrgica de Tubarão, Disponível em: < <http://tyba.com.br/br/registro/40-10-01-33.jpg/-Lingotamento-contínuo-na-Companhia-Siderurgica-de-Tubarao---Vitoria---ES---Brasil---Vitoria---Espirito-Santo---Brasil> >. Acesso em: 07 de julho 2017.

World Steel Association. **Steel Statistical Yearbook**. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/global-map.html>> Acesso em: 28 de março 2017.

## ÍNDICE ONOMÁSTICO

BAZOVSKY I (2004)	36
CALIXTO E. (2016)	37  40
CORVARO F., G. Giacchetta, B. Marchetti, M. Recanati (2017)	18 19
GULATI, Ramesh (2013)	43
HERDER P.M., J.A. van Luijk, J. Bruijnooge (2008)	19, 36
KOMAL, S.P. Sharma, D. Kumar (2010)	19  35
MOUBRAY, John (1997)	38
PALLEROSI, C. A (2007)	34  39  42
PARDEEPKUMAR, R. Kumar, P. Dahmani, D. Narula (2014)	36
SALLAK, S. Desterche, W. Schon, F. Vanderhaegen, D. Berdjag (2015)	41
SHARMA R.K., S. Kumar (2008)	18

## ÍNDICE REMISSIVO

Análise RAM	
RAM	6, 8, 9, 18, 19, 36, 37, 38, 39, 40, 47, 59, 66
ArcelorMittal	6, 7, 10, 16, 17, 21, 26, 43, 44, 54
Cilindro	8, 51, 55, 56, 60, 62
Coleta de Dados	43
Confiabilidade	2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 14, 23, 38, 41, 45, 51, 55, 57, 60, 61, 62, 63, 66, 71
DBF ....	8, 10, 41, 42, 44, 49, 50, 51, 58
disponibilidade	6, 9, 18, 19, 20, 21, 22, 42, 46, 47, 58, 59, 63, 65, 66, 68
Disponibilidade	14
Distribuições estatísticas	44
Elicitação	44
Engenharia de Confiabilidade	6, 14, 21, 59, 68
FMEA	10, 18
Gestão de Ativos	
ISO55	69, 70
ISO55000	14
Gestão de risco	14
Mantenabilidade	6, 8, 18, 19, 21, 38, 42, 45, 46, 47, 50, 54, 56, 57, 58, 64, 65
Máquina de Lingotamento Contínuo	
MLC	
Lingotamento	6, 10, 18, 20, 23, 26, 35, 69
Modelamento	44
Monte Carlo	39, 45
MTBF	10, 45, 63, 64, 68
MTTR	10, 45, 46
Oscilador do Molde	
Oscilador	10, 20, 33, 49, 65
Prolongamento	8, 32, 51, 60, 62, 66, 68
RBD	10, 20, 38, 39, 41
RCA	10, 18
RCM	10, 18
Sistemas Reparáveis	
Reparáveis	37
Weibull	11, 51, 55, 56