

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

**LUIZ CLÁUDIO MONFRADINI**

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO DE FORNO  
ELÉTRICO**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**LUIZ CLÁUDIO MONFRADINI**

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO DE FORNO  
ELÉTRICO**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues.

**CURITIBA**

**2019**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO DE FORNO ELÉTRICO**

por

**LUIZ CLÁUDIO MONFRADINI**

Esta monografia foi apresentada em 07 de novembro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.  
Professor Orientador - UTFPR

---

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

---

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

A minha família, pelos momentos de ausência.  
Ao meu orientador, pelas sábias críticas e por  
me manter focado.

A todos os que, direta ou indiretamente,  
estiveram envolvidos nesse percurso, aqui não  
listados por limitações desse autor, meus  
sinceros agradecimentos.

## RESUMO

MONFRADINI, Luiz Claudio. **Análise de Confiabilidade na Manutenção de Forno Elétrico**. 2019. 41 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Este trabalho examina o comportamento do forno de indução de uma oficina de fundição de uma usina siderúrgica, no que tange ao crescimento da confiabilidade após a implantação da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC), ocorrida em 2010. O forno elétrico é utilizado para fabricação de sobressalentes que são empregados na manutenção das principais plantas produtivas da usina. A investigação analisa se, durante o período de 2010 a 2019, houve, de fato, o crescimento da confiabilidade de tal sistema. Os dados relativos a falhas foram obtidos a partir do sistema de manutenção da empresa, sendo analisados e tratados estatisticamente. O comportamento do *Mean Time Between Failures* (MTBF) foi analisado em intervalos anuais com o *software* RGA, da *Reliasoft*. Observou-se que o crescimento efetivo da confiabilidade só aconteceu após três anos da implantação da MCC.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Manutenção. Forno Elétrico. MTBF.

## **ABSTRACT**

MONFRADINI, Luiz Claudio. **Análise de Confiabilidade na Manutenção de Forno Elétrico**. 2019. 41 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

This paper examines the performance of the induction furnace of a foundry, after the implementation of Reliability Centered Maintenance (MCC) in 2010. The electric furnace is used to manufacture spare parts that are used in the the plant's. The period analyse ocorred from 2010 to 2019 and investigate wether actually occurred or the growth of system requirements. Data related to failures were detected in the company's maintenance system and were statistically analyzed and stored. The Mean Time Between Failure (MTBF) was analyzed at regular intervals with Reliasoft's RGA software. Effective reliability growth was observed only three years after the implementation of Reliability Centered Maintenance (RCM).

**Keywords:** Reliability. Maintenance. Electric Furnace, Reliability Growth, MTBF.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Etapas da pesquisa.....	12
Figura 2.1 – Bicos de lança.....	15
Figura 2.2 – Caixa de refrigeração.....	15
Figura 2.3 – Ventaneiras.....	16
Figura 2.4 – Fornos de indução.....	17
Figura 2.5 – Equivalente elétrico dos fornos de indução.....	19
Figura 2.6 – Sistema de água típico do forno de indução.....	22
Figura 4.1 – Evolução das falhas no tempo.....	37
Gráfico 3.1 – Comparativo das falhas no forno de indução.....	24
Gráfico 4.1 – MTBF em função do tempo (2010).....	31
Gráfico 4.2 – MTBF em função do tempo (2011).....	32
Gráfico 4.3 – MTBF em função do tempo (2012).....	33
Gráfico 4.4 – MTBF em função do tempo (2013).....	34
Gráfico 4.5 – Evolução do MTBF em função do tempo (2010-2018).....	35
Gráfico 4.6 – Produção da fundição de peças.....	36
Gráfico 4.7 – Falhas Acumuladas x Tempo (2010-2019).....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tarefas de manutenção para os sistemas.....	25
Tabela 3.2 – Frequência de intervenção (Sistema de refrigeração de água externa) .....	26
Tabela 4.1 – Dias em que ocorreram as falhas.....	30
Tabela 4.2 – Evolução do coeficiente $\beta$ (2013-2018).....	34



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ACI	Interruptor de Corrente Alternada ( <i>Alternating Current Interrupter</i> )
Bar	Unidade de medida de pressão (símbolo: bar) e que vale 105 Pascal
FR	Fator de Restauração
Hz	Hertz
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
Psi	Unidade de medida de pressão ( <i>Pounds per Square Inch</i> )
Ton	tonelada
Vac	Voltagem em Corrente Alternada ( <i>Voltage Alternated Current</i> )
Vdc	Voltagem em Corrente Contínua ( <i>Voltage Direct Current</i> )
AC	Corrente alternada
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
FMEA	Análise de Modo de Falha e Efeitos ( <i>Failure Mode and Effects Analysis</i> )
FMECA	Análise de Modo de Falha, seus Efeitos e suas Criticidades ( <i>Failure Mode Effects and Criticality Analysis</i> )
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade ( <i>Reliability Centered Maintenance</i> )
MTBF	Tempo Médio entre Falhas ( <i>Mean Time Between Failures</i> )
MTTR	Tempo Médio para Reparo ( <i>Mean Time to Repair</i> )
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
Sismana	Sistema Informatizado de Manutenção da ArcelorMittal Tubarão
Eta ( $\eta$ )	Parâmetro de escala
Beta ( $\beta$ )	Parâmetro de forma

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA .....	9
1.2	OBJETIVOS .....	10
1.2.2	Objetivo Geral.....	10
1.2.3	Objetivos Específicos .....	10
1.3	JUSTIFICATIVA .....	10
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	11
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	13
<b>2</b>	<b>DETALHAMENTO DO EQUIPAMENTO ESTUDADO</b> .....	<b>14</b>
2.1	A EMPRESA: ARCELORMITTAL TUBARÃO .....	14
2.2	FABRICAÇÃO DE PEÇAS .....	15
2.3	FORNO DE INDUÇÃO .....	16
2.4	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	17
2.5	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	17
2.5.1	Capacidade .....	18
2.5.2	Capacidade de Produção Horária .....	18
2.5.3	Consumo de Energia para Fusão.....	18
2.6	EQUIVALENTE ELÉTRICO DOS FORNOS DE INDUÇÃO .....	18
2.7	PRINCIPAIS SISTEMAS .....	20
2.7.1	Sistema Hidráulico.....	20
2.7.2	Sistema de Refrigeração .....	20
2.7.3	Sistema de Água .....	20
2.7.3.1	Água de Resfriamento.....	21
2.7.3.2	Cabos Refrigerados por Água .....	22
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>23</b>
3.1	<i>FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS</i> E MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE.....	23
3.2	PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO DO FORNO DE INDUÇÃO DESENVOLVIDA EM 2010 .....	24
3.3	TEORIA DA CONFIABILIDADE APLICADA NESTE ESTUDO .....	26
3.3.1	Confiabilidade.....	26
3.3.2	Modelos Matemáticos: Principais Distribuições.....	27
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS da ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE</b> .....	<b>30</b>
4.1	COLETA E TRATAMENTO DE DADOS .....	30
4.2	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>39</b>
5.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

A manutenção de equipamentos em oficinas situadas no interior de plantas industriais favorece atendimentos prioritários, principalmente emergências e urgências, o que contribui para garantir a estabilidade operacional do *site*, propiciando benefícios não só na produção, mas também em diferentes aspectos da sustentabilidade, tais como segurança, meio ambiente e resultados financeiros.

A ArcelorMittal Tubarão, usina siderúrgica instalada no Espírito Santo, estrategicamente, possui, entre outras, uma oficina de fundição de peças, responsável pela fabricação de sobressalentes para todas as unidades da empresa, tais como caixas de refrigeração, ventaneiras para altos-fornos, bicos de lança e de sublança para convertedores, pote de escória, moldes de gusa, *door frames* etc.

A área de fundição de peças da empresa atua em conjunto com outros setores de apoio e é responsável pela fabricação de aproximadamente 90% das peças fundidas utilizadas pela siderúrgica. Entre os equipamentos envolvidos no processo, destaca-se o forno de indução, doravante denominado de sistema, sendo objeto da avaliação realizada no âmbito deste trabalho, o qual será abordado mais adiante.

Assim, ao longo deste estudo, foram analisados os dados de falhas ocorridos no forno de indução no período de 2010 a 2019, considerando o comportamento desse sistema após a implantação da manutenção centrada em confiabilidade (MCC), em 2010.

Uma das premissas para sucesso da manutenção é a maior confiabilidade dos equipamentos, que pode ser alcançada por meio da atuação de equipes capacitadas, uma metodologia voltada à prevenção, novas tecnologias, entre outros aspectos. Nesse sentido, a redução de falhas em equipamentos torna-se um fator determinante na busca do aumento da confiabilidade, sendo esta, segundo a NBR 5.462:1994, entendida como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.2 Objetivo Geral

Examinar o comportamento do forno de indução da oficina de fundição da siderúrgica ArcelorMittal Tubarão no que se refere à confiabilidade, após a implantação da MCC (período 2010-2019).

### 1.2.3 Objetivos Específicos

- Levantar os dados relativos ao histórico de falhas no recorte temporal da pesquisa;
- identificar o comportamento da vida do sistema após reparos de manutenção;
- expandir os conceitos da ferramenta de manutenção centrada em confiabilidade (MCC) às equipes que atuam na oficina de manutenção.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O processo de fundição consiste na produção de peças metálicas por meio da fusão de ferro, aço ou metais não ferrosos, como alumínio, zinco, cobre etc. Nesse processo, peças complexas podem ser fabricadas de forma econômica e rápida.

A fundição de peças, geralmente, é feita em uma fábrica chamada de fundição, sendo uma das etapas de destaque do processo a própria fusão dos metais, a qual ocorre em fornos. Esse processamento pode ser realizado em fornos elétricos a arco, forno por indução, *Cubilot*, entre outros.

A razão para se proceder à avaliação do comportamento das falhas do forno de indução da oficina de fundição da ArcelorMittal Tubarão está associada à importância deste equipamento para o processo de fundição de peças a partir do uso de metais ferrosos e não ferrosos.

Outro fator que justifica a avaliação relaciona-se ao fato de que a área de fabricação de peças é estratégica para a ArcelorMittal Tubarão, pois recebe demanda que vem se ampliando. No período de 2016 a 2019, o crescimento de

itens fundidos aumentou cerca de 49%, passando de uma média mensal de 98,74 ton/mês, em 2016, para 147,24 ton/mês, em 2019.

Para que a produção se mantenha ou até mesmo se expanda, é importante que os equipamentos operem de forma adequada, sem interrupções de funcionamento, ou seja, com garantia de confiabilidade e elevado índice de disponibilidade, pois, do contrário, resultará em perdas significativas no volume de produção das peças demandadas.

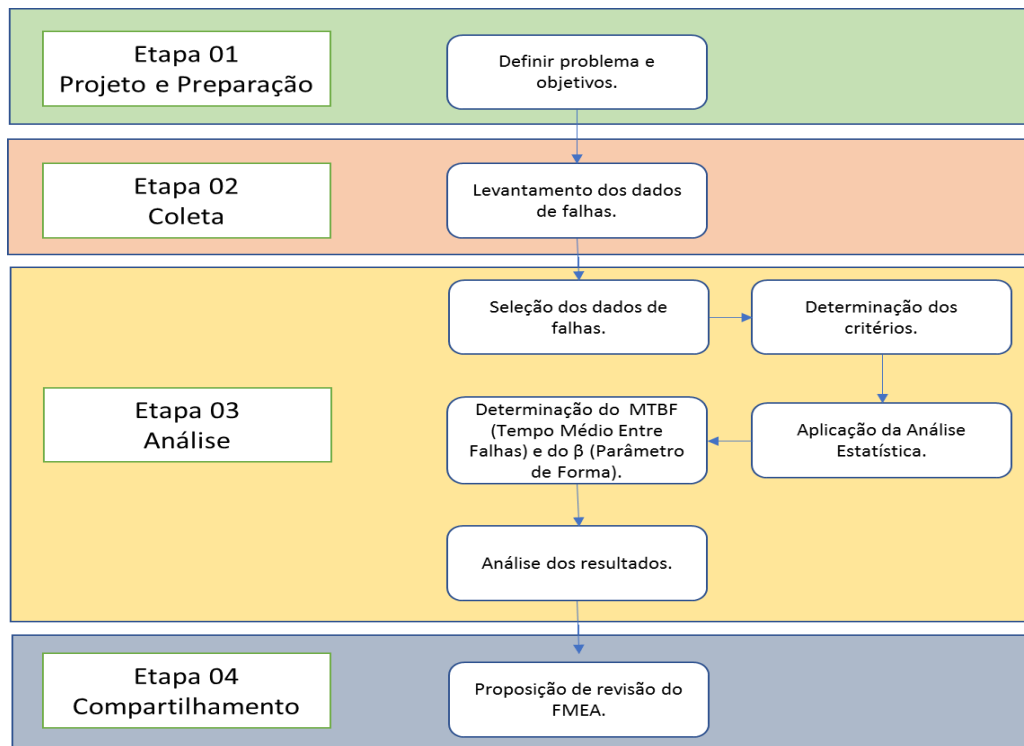
Assim, este trabalho pretende avaliar o comportamento da confiabilidade e, caso necessário, gerar correções no plano de manutenção, a fim de garantir a disponibilidade e a confiabilidade do forno.

#### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A partir da classificação apresentada por Gil (2005), esta pesquisa constitui-se em um estudo de caso, o qual consiste em uma estratégia que possibilita ao pesquisador analisar eventos reais a partir de uma visão mais integral e aprofundada. Ainda segundo o mesmo autor, caracteriza-se, também, como estudo descritivo, pois vários dados sobre as falhas do forno elétrico foram coletados, registrados e analisados.

Objetivando melhor compreensão, o fluxo descrito na Figura 1.1 descreve o passo a passo do desenvolvimento da pesquisa.

Figura 1.1 – Etapas da pesquisa



Fonte: o autor (2019).

A Etapa 01 se refere à definição do problema e objetivos da pesquisa, já apresentados, enquanto a Etapa 02 diz respeito ao processo de coleta de dados, ou seja, o levantamento de informações contidas em relatório de falhas de equipamentos a partir do Sistema Informatizado de Manutenção (Sismana) da ArcelorMittal Tubarão, tendo-se como base o período de 02/06/2010 a 21/05/2019.

A Etapa 03, por sua vez, está relacionada à análise dos dados, sendo subdividida em cinco itens, a saber: seleção dos dados de falha, determinação dos critérios, aplicação de análise estatística, determinação dos parâmetros e, por fim, a análise dos resultados.

A seleção requer análise detalhada dos dados coletados, principalmente, porque nem todas as informações obtidas estavam relacionadas com as falhas do equipamento. O estágio subsequente é a determinação dos critérios, pois somente foram considerados neste estudo falhas oriundas de parada do equipamento em urgência ou emergência. Assim, foram desconsideradas as manutenções realizadas em paradas preventivas.

A aplicação de análise estatística se deu com o emprego do *software Reliability Growth Analysis (RGA)*, da *Reliasoft*, com o qual foi avaliado o

comportamento gráfico da série histórica do índice de falhas, calculando-se o Tempo Médio entre Falhas (do inglês *Mean Time Between Failures* – MTBF) e o  $\beta$  (parâmetro de forma). Os resultados estatísticos foram analisados, sendo possível, na quarta e última etapa, avaliar o comportamento da confiabilidade do sistema a partir da implantação da MCC.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além desta Introdução, o presente trabalho é composto por outros quatro capítulos, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 2, é apresentado o forno de indução, objeto desta pesquisa, detalhando-se o equipamento, seu princípio de funcionamento, os principais materiais fundidos, suas principais características, seus sistemas e componentes.

No Capítulo 3, aborda-se o estudo da aplicação da MCC a partir de Vieira (2010) e de outros referenciais teóricos da Engenharia da Confiabilidade aplicáveis ao trabalho.

O Capítulo 4, por sua vez, discorre sobre a aplicação das ferramentas da confiabilidade, sendo que a medida de confiabilidade considerada no trabalho é o MTBF, captado com o modelo matemático do *software* RGA.

Por fim, no Capítulo 5, apresenta-se a conclusão a que os resultados permitiram chegar, bem como recomendações para trabalhos futuros.

## 2 DETALHAMENTO DO EQUIPAMENTO ESTUDADO

Neste capítulo, apresenta-se, de forma concisa, a empresa lócus do estudo, bem como o setor de fundição de peças e sua importância estratégica para a usina siderúrgica. Nesse contexto, está inserido o forno de indução, objeto deste estudo, sendo abordado seu princípio de funcionamento, os principais materiais fundidos, suas principais características, seus sistemas e componentes.

### 2.1 A EMPRESA: ARCELORMITTAL TUBARÃO

A ArcelorMittal Tubarão está instalada no município da Serra, Espírito Santo, estando sua origem ligada à criação da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), juridicamente constituída em 1974, a partir de parceria entre o governo brasileiro e as empresas Kawasaki, do Japão, e Finsider, da Itália (A ARCELORMITTAL..., 2017).

Na década anterior, entretanto, já se fazia planos de se ter uma empresa que pudesse aproveitar o potencial logístico representado pela presença da combinação Estrada de Ferro Vitória-Minas (pela qual poderia ser recebido o carvão mineral) e mar (por onde poderia ser escoada a produção). Sua construção, entretanto, somente viria a ser iniciada em 1978. As instalações do alto-forno, propriamente, se iniciaram em 1980 (RÉGIS, 2016).

A CST foi inaugurada em 1983. Ao longo do tempo, passou por profundas transformações, tanto na estrutura acionária quanto no processo produtivo, o que inclui o aumento do volume de produção e diversidade de produtos. Após 1992, quando ocorreu sua privatização, a companhia realizou investimentos voltados à expansão de seu parque industrial, implantação de novas tecnologias, controle ambiental e melhoria de qualidade. Em 2006, passou a fazer parte do Grupo ArcelorMittal, maior produtor de aço do mundo, recebendo a denominação atual: ArcelorMittal Tubarão (A ARCELORMITTAL..., 2017).

A ArcelorMittal Tubarão é uma usina de produção de aço integrada. Isso significa que a unidade realiza todas as etapas do processo: produção de coque, sinter e gusa, fabricação do aço líquido, lingotamento em placas e laminação. Atualmente, sua capacidade de produção anual é de 7,5 milhões de toneladas de aço em placas e bobinas a quente (A ARCELORMITTAL..., 2017).



## 2.2 FABRICAÇÃO DE PEÇAS

A área de fabricação de peças é estratégica para a ArcelorMittal Tubarão, sendo responsável pela fabricação de diversos sobressalentes empregados na manutenção das principais plantas produtivas da usina e em seus variados processos. Nesse contexto, destacam-se as peças de cobre, tais como bicos de lança (Figura 2.1), caixas de refrigeração de altos-fornos (Figura 2.2) e ventaneiras (Figura 2.3).

Figura 2.1 – Bicos de lança



Fonte: o autor (2019).

Figura 2.2 – Caixa de refrigeração



Fonte: o autor (2019).

Figura 2.3 – Ventaneiras



Fonte: o autor (2019).

Ventaneiras são peças conectadas às caixas de refrigeração e refrigeradas por água, formando um conjunto ventaneira-caixa de refrigeração. São utilizadas nos altos-fornos e sujeitas a condições químicas extremamente complexas e agressivas. Sua função é direcionar o ar quente, soprado para estimular a queima do carvão uniformemente ao redor do forno. A quantidade de ventaneiras e caixas de refrigeração em um forno vai depender do diâmetro do cadinho, podendo chegar a 40 conjuntos em grandes altos-fornos.

Bicos de lança, por sua vez, são peças de cobre empregadas no processo de obtenção do aço, em equipamento denominado lança de oxigênio, sendo utilizada para injeção de oxigênio nos convertedores.

### 2.3 FORNO DE INDUÇÃO

Na área de fundição de peças da empresa, existem inúmeros equipamentos importantes para o bom desenvolvimento das atividades, sendo um deles o forno de indução, objeto deste estudo. Sendo assim, passa-se, a seguir, a detalhar este equipamento, seu princípio de funcionamento, os principais materiais nele fundidos, suas principais características e os sistemas que o compõem.

Figura 2.4 – Fornos de indução



Fonte: o autor (2019).

A Figura 2.4 apresenta as instalações reais dos fornos de indução da ArcelorMittal Tubarão, os quais têm capacidade de produção de 1,5 ton e 3 ton, conforme informa o manual do fabricante (*Inductotherm*).

## 2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A indução é resultado das descobertas realizadas por Michael Faraday. Trata-se de um processo em que uma corrente flui por meio de uma bobina composta por material condutor, o qual é capaz de produzir um campo magnético ao seu redor. É o desenho da bobina que vai determinar a capacidade de funcionamento do campo magnético (INDUCTOTHERM GROUP BRASIL, acesso em 12 jul. 2019).

É a condutividade elétrica inserida dentro de um campo magnético que promove o aquecimento e, assim, permite os fornos de indução fundirem metais nele armazenados.

O interessante é que não é necessário que o objeto a ser aquecido seja de material magnético; para ser aquecido de forma eficiente, o importante é que ele apenas seja condutor de eletricidade, conforme fabricante *Inductotherm* (O QUE É INDUÇÃO?, acesso em 12 jul. 2019).

## 2.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

As informações relativas às características técnicas dos fornos de indução da oficina de fundição da ArcelorMittal Tubarão foram obtidas em consulta ao padrão

técnico PT-MAN-OFFU-00-0003, documento interno da companhia, o qual está em sua quinta revisão.

### 2.5.1 Capacidade

O Forno de Indução 1 tem capacidade de 3.000 Kg, podendo chegar a 3.700 Kg. A capacidade do Forno de Indução 2, por sua vez, é de 1.500 Kg, podendo atingir 1.700 Kg.

### 2.5.2 Capacidade de Produção Horária

A capacidade de produção/hora dos fornos varia conforme o material que está em seu interior. Desse modo, com potência de 1.000 kW e frequência de 500 Hz, tem-se:

- **aço:** 1.530 Kg/h com temperatura média de 1.650 °C;
- **bronze:** 2.500 Kg/h com temperatura média de 1.180 °C;
- **ferro fundido:** 1.700 Kg/h com temperatura média de 1.480 °C.

### 2.5.3 Consumo de Energia para Fusão

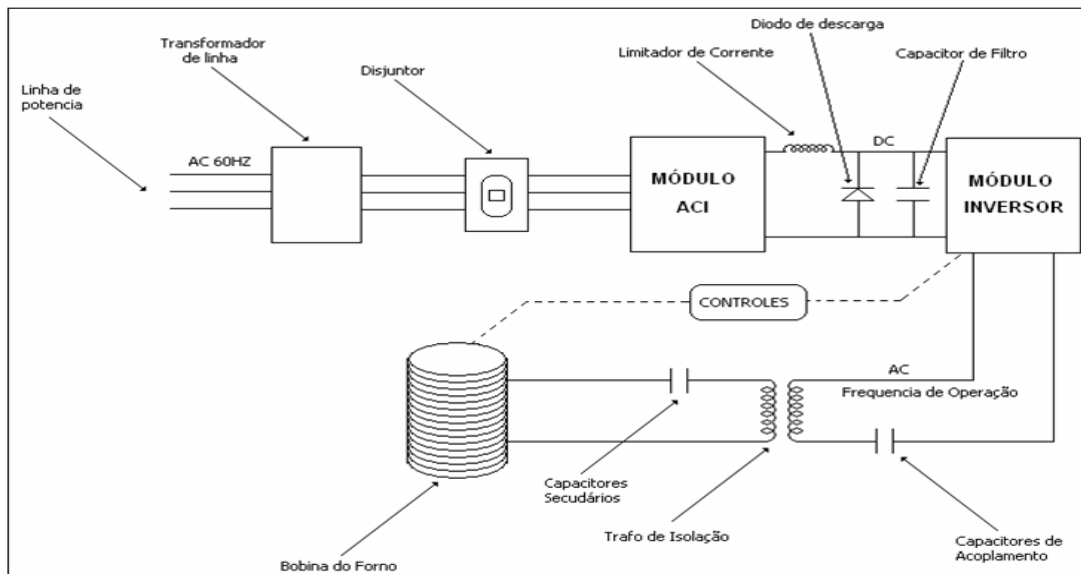
O consumo de energia para fusão também é um fator que depende do tipo de material que está no forno, tendo-se os seguintes parâmetros:

- **aço:** 555 kWh/ton, com temperatura média de 1.650 °C;
- **bronze:** 293 kWh/ton, com temperatura média de 1.180 °C;
- **ferro fundido:** 500 kWh/ton, com temperatura média de 1.480 °C.

## 2.6 EQUIVALENTE ELÉTRICO DOS FORNOS DE INDUÇÃO

A Figura 2.5 mostra a representação do diagrama em blocos simplificados do sistema elétrico com o transformador de alta frequência, conforme orientações do fabricante (*Inductotherm*).

Figura 2.5 – Equivalente elétrico dos fornos de indução



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2010).

A seguir, apresenta-se a descrição dos principais itens que estão em sua composição.

- a) **Circuito de entrada de potência:** o circuito elétrico dos fornos de indução possui, na sua entrada, um transformador de linha que trabalha na relação de transformação de 13,8 Kv/440 Vac em uma frequência de 60 Hz;
- b) **disjuntor:** o circuito elétrico principal dos fornos de indução possui um disjuntor ultrarrápido, o qual possui as seguintes características:
  - circuito auxiliar de subtensão, que tem como função básica desligar o forno para tensões abaixo de 460 Vac;
  - circuito de comando da bobina do disjuntor com ligação em série com as portas do painel elétrico, cuja função é desligar o disjuntor, caso a porta seja aberta;
- c) **módulo ACI (do inglês *Alternating Current Interrupter*):** o circuito elétrico dos fornos é composto por um módulo tiristorizado, cuja função é retificar a tensão de entrada; possui, ainda, circuitos auxiliares de proteção, para desligar a alimentação elétrica para o forno de indução na ocorrência dos seguintes eventos: sobrecorrente, sobretensão; frequência elevada ou falhas eletrônicas dos diversos circuitos;
- d) **módulo inversor:** faz a inversão do sinal de corrente contínua para um sinal de corrente alternada (AC), com a vantagem de permitir o controle

da frequência do circuito na faixa de 200 a 800 Hz, podendo-se, dessa forma, controlar a potência do forno de indução, uma vez que ela é diretamente proporcional à variação de frequência do circuito;

- e) **bobina indutora:** tem a função de gerar o campo magnético para aquecer a carga metálica, pelo processo de indução eletromagnética, sendo composta por tubos de cobre de 1 ½ polegadas refrigerados por água.

## 2.7 PRINCIPAIS SISTEMAS

### 2.7.1 Sistema Hidráulico

Este sistema é responsável pelo basculamento dos fornos de indução e movimentos de abertura e fechamento da tampa dos fornos. É constituído de uma unidade hidráulica, duas bombas e um painel de comando.

### 2.7.2 Sistema de Refrigeração

Sistema de água fechado, no qual a água é bombeada para os componentes a serem refrigerados. Após as trocas térmicas, a água passa pela torre de refrigeração e retorna à origem para ser recirculada.

### 2.7.3 Sistema de Água

A maior parte do equipamento, contido na cabina ou módulo é refrigerada por água. Existem dois sistemas de água que são usados em fornos de indução: sistema interno de circuito fechado e sistema de água externo.

O primeiro promove a circulação da água destilada, deionizada, e inclui um trocador de calor água-água. Quando utilizados, os módulos de *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) e a ponte retificadora trifásica, reatores, capacitores de acoplamento e comutação, transformador e capacitores são conectados neste sistema.

O sistema de água externo, por sua vez, fornece água para refrigerar o trocador de calor do sistema interno e, também, as bobinas do forno. Em alguns sistemas, a água de refrigeração do trocador de calor interno também é usada para

resfriamento do forno. Em sistemas menores, este líquido refrigerado externo é transferido para o *manifold* externo, sem passar pelos fornos. O sistema de água externa é projetado para usar água de fontes variadas, incluindo fontes locais.

Ambos os sistemas de água (externo e interno) possuem manômetros para controle de pressão e pressostatos para desligar o inversor, se a pressão cair abaixo do nível pré-fixado. Lâmpadas indicadoras do circuito monitor mostrarão qual sistema de água causou o desligamento do inversor.

Os drenos de ambos os sistemas também são controlados por termostatos. Se a água de retorno do dreno atingir o nível de temperatura excessiva, o inversor se desliga. Novamente, as lâmpadas indicadoras mostrarão qual dos sistemas provocou o desligamento.

#### 2.7.3.1 Água de Resfriamento

Instalações individuais, tais como conexões de água para a cabine e forno, podem variar bastante. Todas as conexões da água para os componentes elétricos são feitas com mangueiras de borracha de baixa condutividade. O comprimento mínimo de qualquer mangueira, conectando um ponto de potencial AC ao *manifold* aterrado, deve ser de 18 polegadas (50 cm). Esse mesmo comprimento mínimo se aplica para mangueiras que conectam pontos de polaridades opostas em circuito AC. É importante ressaltar que nem todas as mangueiras possuem baixa condutividade, sendo necessário, portanto, testar esse quesito em cada uma, quando se trata de mangueiras fornecidas pela *Inductotherm*.

Com 600 Vdc aplicados por meio de garras-jacaré em amostra de mangueira de 5 polegadas (13 cm), a corrente de fuga não deve exceder 20 microamperes. A maioria das mangueiras de neoprene curadas reúne esses requisitos. Mangueiras contendo carbono não são recomendadas, em decorrência de sua alta condutividade.

O *manifold* de entrada da unidade é equipado com pressostato e termostato, dispositivos que desligarão o relé de controle do inversor, se a pressão da água de alimentação for inferior a 40 psi (2,8 bar).

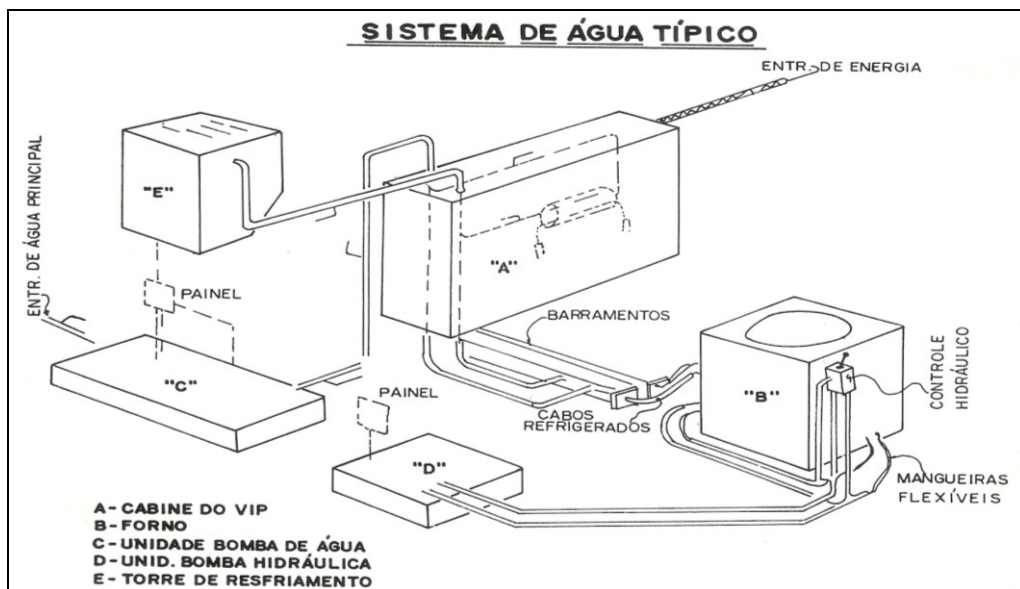
### 2.7.3.2 Cabos Refrigerados por Água

Os cabos refrigerados por água devem ser usados onde for requerido um condutor flexível, qualquer que seja. Nos locais em que for possível, deve-se proceder a verificações regulares na temperatura da água de refrigeração e fluxo.

As leituras devem ser registradas e comparadas às anteriores, para se verificar a ocorrência de mudanças nas condições de operação. Estas, se constatadas, devem ser observadas como possíveis fontes de problemas.

A Figura 2.6 mostra o esquema do fluxo de água típico de um forno de indução.

Figura 2.6 – Sistema de água típico do forno de indução



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2010).

A unidade de bomba de água é responsável por bombear água para todas as partes que necessitem de refrigeração no equipamento. A torre de resfriamento é ligada, assim como a unidade de bombeamento, à parte de refrigeração do forno. No processo de refrigeração do equipamento, a água é aquecida. Trata-se de um ciclo. Em novo ciclo, a água tem de, novamente, estar em temperatura semelhante àquela com a qual o ciclo anterior foi finalizado.

Existem diversos componentes para monitoração da água de refrigeração, a saber: termostatos, pressostatos, manômetros e fluxostatos. Sua finalidade é o monitoramento contínuo da pressão, temperatura e fluxo da água de refrigeração.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem o objetivo de discorrer sobre o resultado da aplicação da MCC obtido por Vieira (2010), que apresentou uma proposta de otimização do plano de manutenção do principal equipamento da oficina de fundição da ArcelorMittal Tubarão, o forno de indução, na qual sugeriu a inclusão de critérios e conceitos de MCC, além de apresentar a teoria de confiabilidade utilizada no presente trabalho.

Em levantamento realizado no Sismana da ArcelorMittal Tubarão, Vieira (2010) constatou que, no sistema do forno de indução, o sistema de refrigeração de água externa foi o que apresentou maior número de falhas de 2007 a 2009. Após a aplicação da MCC, foi necessário aumentar as tarefas de manutenção/inspeção em 120% em relação ao plano anterior, além das atividades preditivas. A manutenção preditiva consiste no acompanhamento e monitoramento periódico das condições e dos principais parâmetros de operação de um equipamento, sem a necessidade de se realizar paradas na produção (BRANCO FILHO, 2006).

Entretanto, após a implantação da proposta, não havia a certeza de que as medidas haviam contribuído para o crescimento da confiabilidade do equipamento. Desse modo, a proposta deste estudo é, tomando-se como referência o recorte temporal 2010-2019, analisar se isso, de fato, ocorreu, uma vez que a indisponibilidade de equipamentos críticos pode interferir no desempenho fabril (FAGUNDES et al., 2011).

No período analisado, outras intervenções no plano de manutenção foram realizadas. Dessa forma, o presente trabalho não se limitou a analisar somente os modos de falha associados ao sistema de refrigeração, incluindo todas as que ocorreram no equipamento durante o período mencionado.

#### 3.1 *FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS* E MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

Para Yang et al. (2006), *Failure Mode and Effect Analysis* é uma metodologia sistemática que permite identificar potenciais falhas de um sistema, projeto e/ou processo, com o objetivo de eliminar ou minimizar os riscos associados, antes que tais falhas aconteçam. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994), na NBR 5.462:1994, utiliza a expressão “modo de falha” para caracterizar o

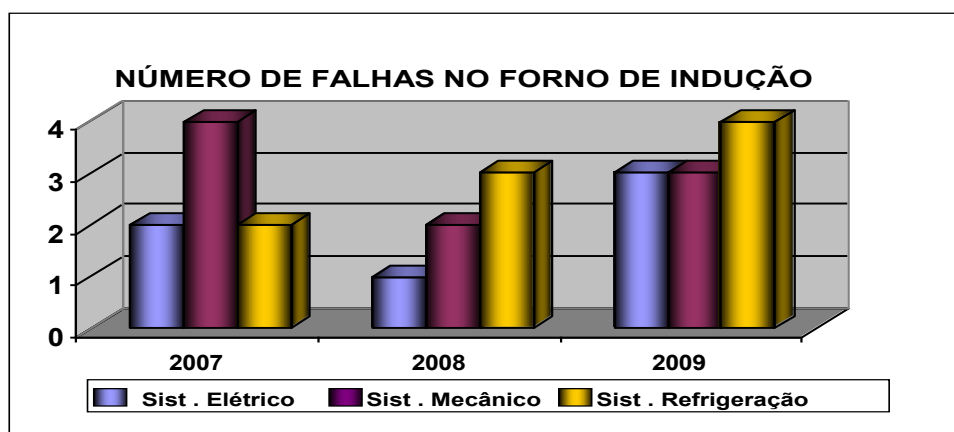
processo e o mecanismo de falha que ocorrem nos itens. O efeito é a maneira como o modo de falha se manifesta.

No que diz respeito à manutenção centrada em confiabilidade, uma de suas características é fornecer um método estruturado para selecionar as atividades de manutenção para qualquer processo produtivo (SIQUEIRA, 2005). É parte integrante deste trabalho reavaliar, com base nos resultados obtidos no Capítulo 4, o plano de manutenção do forno de indução, fundamentado na metodologia MCC.

### 3.2 PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO DO FORNO DE INDUÇÃO DESENVOLVIDA EM 2010

No trabalho de aplicação da MCC desenvolvido por Vieira (2010), o sistema de refrigeração de água externa do forno de indução da oficina de fundição de peças da ArcelorMittal Tubarão foi definido como piloto. Isso porque, conforme dito, em levantamento realizado no Sismana, foi constatado que tal sistema havia apresentado o maior número de falhas de 2007 a 2009, o que se pode verificar no Gráfico 3.1.

Gráfico 3.1 – Comparativo das falhas no forno de indução



Fonte: Vieira (2010, p. 49).

O trabalho foi executado a partir da sequência preconizada por Siqueira (2005), considerando, desse modo, a seguinte estrutura:

- seleção do sistema e coleta de informações;
- análise de modos de falha e efeitos;
- seleção de funções significantes;
- seleção de atividades aplicáveis;

- avaliação da efetividade das atividades;
- seleção das atividades aplicáveis e efetivas;
- definição da periodicidade das atividades.

Na análise conclusiva da aplicação da MCC no sistema de refrigeração de água externa do forno de indução, Vieira (2010) destaca que o sistema existente no Sisma era pouco abrangente em termos de itens funcionais e subfunções. Para muitos dos itens, as causas de falha não estavam sendo monitoradas ou mantidas. Isso deixava o equipamento em risco de parada por falha, podendo comprometer sua disponibilidade e segurança.

Para Capetti (2005), dentro do contexto de manufatura, com mudanças no processo industrial enfatizando cada vez mais a produção enxuta, a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos são cruciais. Assim, após a aplicação da MCC, Vieira (2010) observou aumento de 120% nas tarefas de manutenção/inspeção em relação ao plano anterior, já que o número de intervenções saltou de 46 para 101 intervenções.

Quando levado em consideração o conjunto dos sistemas, a Tabela 3.1, a seguir, revela aumento de 300% nas tarefas de manutenção, saindo de 12 intervenções para 48. Do mesmo modo, também houve aumento nas inspeções preditivas: antes da implantação da MCC, eram realizadas três inspeções, elevando-se, posteriormente, para 23.

Tabela 3.1 – Tarefas de manutenção para os sistemas

Sistemas	Tarefas de manutenção		Tarefas de inspeção sensitiva		Tarefas de inspeção preditiva	
	Antes da MCC	Após a MCC	Antes da MCC	Após a MCC	Antes da MCC	Após a MCC
Sistema de Troca de Calor	3	14	13	10	1	4
Bombeamento e Reservatório	3	14	7	3	2	10
Sistema de Circulação de Água	0	4	8	12	0	6
Distribuição Elétrica	6	14	3	4	0	3
Sistema de Água de Emergência	0	2	0	1	0	0
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>48</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>3</b>	<b>23</b>

Fonte: Vieira (2010, p. 71).

Ao analisar a aplicação da MCC no sistema de refrigeração de água externa do forno de indução, Vieira (2010) mostrou que muitos dos planos existentes não

eram eficientes ou não havia necessidade de parada do equipamento para que fosse feito o diagnóstico ou manutenção.

Tabela 3.2 – Frequência de intervenção (Sistema de refrigeração de água externa)

Condição do equipamento	63 dias		90 dias		182 dias		365 dias	
	Antes da MCC	Após a MCC	Antes da MCC	Após a MCC	Antes da MCC	Após a MCC	Antes da MCC	Após a MCC
Parado e desligado	38	0	0	0	0	19	0	19
Funcionando	8	0	0	25	0	13	0	19
<b>Total</b>	<b>46</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>38</b>

Fonte: Vieira (2010, p. 72).

A partir disso, a Tabela 3.2 mostra que, após a MCC, o prazo de manutenção em equipamento parado e desligado se estenderia de 63 para 182 dias. Em função disso, a redução nas paradas de equipamento poderia se alterar de cinco para duas vezes ao ano, sugerindo aumento de sua disponibilidade. A manutenção de equipamento em funcionamento também pode ser estendida, sendo necessária somente em 90 dias, quando, anteriormente, ocorria em 63 dias.

### 3.3 TEORIA DA CONFIABILIDADE APLICADA NESTE ESTUDO

A proposta deste estudo consiste em avaliar o desempenho do forno de indução da ArcelorMittal Tubarão no período 2010-2019, verificando se, de fato, houve melhora positiva da confiabilidade com as mudanças implantadas a partir da análise realizada por Vieira (2010).

#### 3.3.1 Confiabilidade

Pinto e Lafraia (2002) explicam que o termo confiabilidade é aplicado em diversas áreas, sendo a gestão da manutenção uma delas. A matemática da determinação da probabilidade de um evento ocorrer inicia-se pela modelagem da variação no tempo da probabilidade, por unidade de tempo, definida por uma função de distribuição de probabilidade dada pela Equação 1, a seguir.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

Onde:

- $f(t)$  é a função densidade de probabilidade de falha;
- $F(t)$  é a distribuição de probabilidade acumulada de falhas a partir de um determinado instante.

Almeida e Souza (2001) consideram que  $F(t)$  representa a probabilidade de que um item ou sistema falhar até o tempo  $t$  (variável de interesse), sendo a  $R(t)$  a probabilidade acumulada de não falha. Logo o somatório de  $R(t)$  e  $F(t)$  deverá ser um valor unitário. Assim, em um tempo  $t$ , a função de confiabilidade  $R(t)$  é dada pela Equação 2.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_t^{\infty} f(u) du \quad (2)$$

### 3.3.2 Modelos Matemáticos: Principais Distribuições

Modelos matemáticos de vida são aplicados em cada relação de estresse. Entre os mais utilizados, estão: normal, exponencial e *Weibull*, sendo esse último o considerado neste estudo. A distribuição normal ou gaussiana é uma das distribuições de probabilidade mais utilizadas para modelar fenômenos naturais, tendo como principais parâmetros a média e o desvio-padrão. Sua função densidade de probabilidade é dada por Kortum (apud ASTOLPHO et al., 2005):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3)$$

Onde:

- $\mu$  é a média;
- $\sigma$  é o desvio-padrão.

A distribuição exponencial é utilizada em confiabilidade como um modelo para a distribuição dos tempos até a falha. De acordo com Herrmann (2011), a função densidade de probabilidade (fdp) para uma variável  $t$  é dada pela Equação 4.

$$f(t) = \alpha \exp(-\alpha t) \quad (4)$$

Onde  $\alpha$  é o tempo médio de vida.

Nomeado graças ao trabalho de Ernest Hjalmar Waloddi Weibull (1887-1979), o modelo matemático *Weibull* é uma das mais populares e aplicáveis distribuições de probabilidade dentro das áreas de análise e previsão de falhas de todos os tipos de não execução de algum item ou sistema (WEIBULL, 1951). Sua modelagem é representada pelas seguintes equações:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[ \frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (5)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

Sua função de confiabilidade, por sua vez, é definida por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (7)$$

A Equação 8 define a função probabilidade de falha:

$$Q(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (8)$$

A taxa de falhas é obtida pela Equação 9.

$$\chi(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \quad (9)$$

Onde  $\beta$  é o parâmetro de forma ou fator de forma, indicando a forma da curva e a característica das falhas; para  $\beta < 1$ , tem-se taxa de falhas decrescente, o que denota mortalidade infantil, conforme “curva da banheira”; para  $\beta = 0$ , tem-se taxa de falha constante, ou seja, falha aleatória; por fim, para  $\beta > 1$ , tem-se taxa de falha crescente e falhas por desgaste (SELLITTO, 2005). O parâmetro  $\eta$  (parâmetro de escala) corresponde a 63,2% das falhas, restando, portanto, 36,8% de itens sem falhar. Este modelo permite:

- representar falhas típicas de partida de equipamentos (mortalidade infantil), falhas aleatórias e falhas em função de desgaste;
- obter parâmetros significativos da configuração das falhas;
- representação gráfica simples.

Outro modelo considerado foi a Lei de Potência Inversa. Utilizado para modelar o tempo de falha em função de qualquer tipo de variável de estresse, sua modelagem é dada por:

$$T = A/V^{\omega} \quad (10)$$

Onde:

- V é a variável de estresse;
- T o tempo de falha;
- A e  $\omega$  são parâmetros característicos do item.

Os modelos matemáticos aqui destacados constituem-se como base para o experimento apresentado no Capítulo 4, o qual permite analisar o crescimento de confiabilidade, avaliando o desempenho de um sistema reparável, neste caso, o forno de indução da oficina de fundição da ArcelorMittal Tubarão.

## 4 APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Este capítulo discorre sobre a aplicação das ferramentas da confiabilidade, sendo que a medida de confiabilidade considerada no trabalho é o MTBF, captado com o modelo matemático do *software* RGA. O procedimento consiste em investigar os tempos de falha e, a partir desses dados, levantar as informações quantitativas por meio da utilização do *software* RGA. Após a inserção dos dados de falhas, uma das informações que podem ser extraídas é a curva MTBF(t) x tempo, que mostra a evolução do MTBF com o decorrer do tempo.

### 4.1 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

Os dados provêm do Sistema Informatizado de Manutenção da ArcelorMittal Tubarão, coletados de 02/06/2010 a 21/05/2019, sendo apenas atendimentos de manutenção corretiva do equipamento. Na Tabela 4.1, os dias 0 e 2910º são, respectivamente, marcos inicial e final. Os demais são dias de ocorrência de falhas. Logo, a primeira aconteceu no 16º dia, com novo registro somente no 71º dia (duas falhas). No 76º dia, ocorreu a quarta falha, o que só viria a se repetir no 142º dia.

Vale salientar que, nesta análise, não foi considerado o modo de falha, mas, sim, as falhas ocorridas no período considerado. Para avaliar o aumento ou redução da confiabilidade, foi utilizado como medida o MTBF.

Tabela 4.1 – Dias em que ocorreram as falhas

0	594	1206	1697	2330
16	608	1209	1700	2413
71	609	1211	1805	2456
71	637	1212	1854	2541
76	650	1213	1909	2666
142	654	1217	1916	2708
240	694	1288	1916	2708
250	709	1396	1916	2826
253	989	1476	2022	2849
419	1013	1485	2204	2855
420	1044	1527	2280	2910
467	1083	1543	2311	
513	1168	1659	2311	

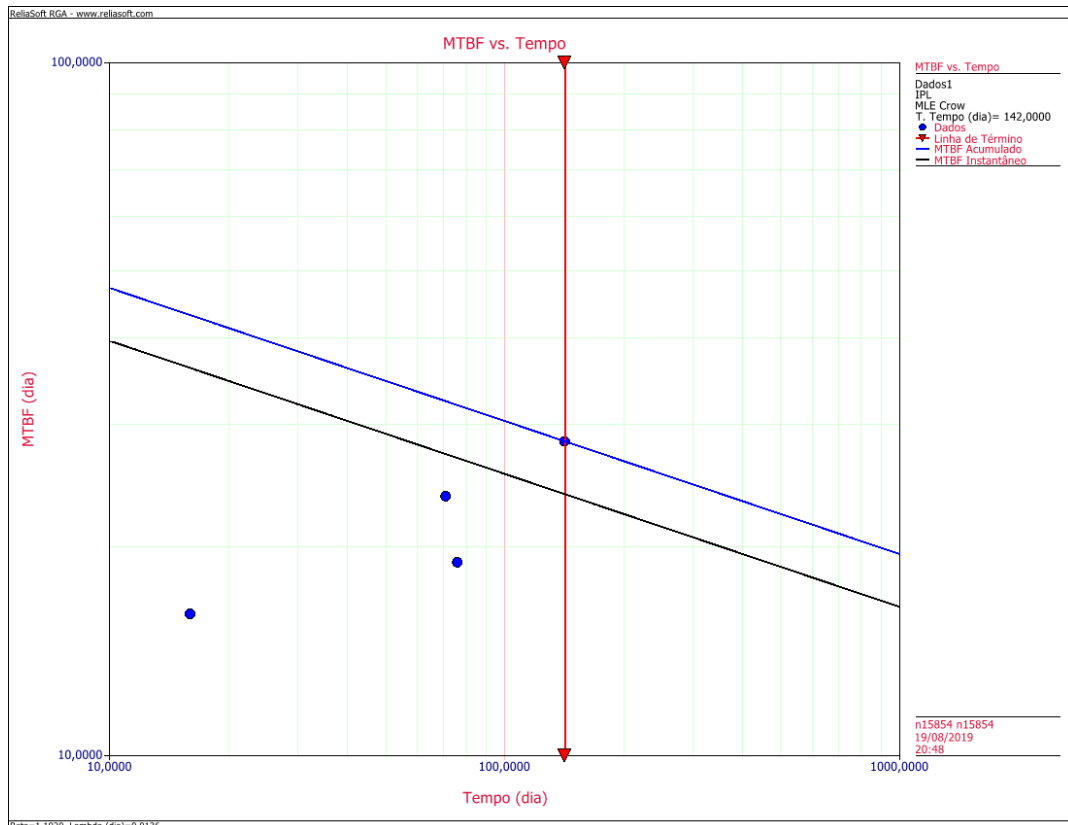
Fonte: o autor (2019), a partir do Sismana/ArcelorMittal.



A análise foi realizada com o *software* RGA e possibilitou avaliar o comportamento gráfico do MTBF ano a ano.

O Gráfico 4.1 mostra o decréscimo do MTBF em 2010, revelando que, logo após a implantação da MCC, o resultado esperado ainda não havia sido obtido.

Gráfico 4.1 – MTBF em função do tempo (2010)

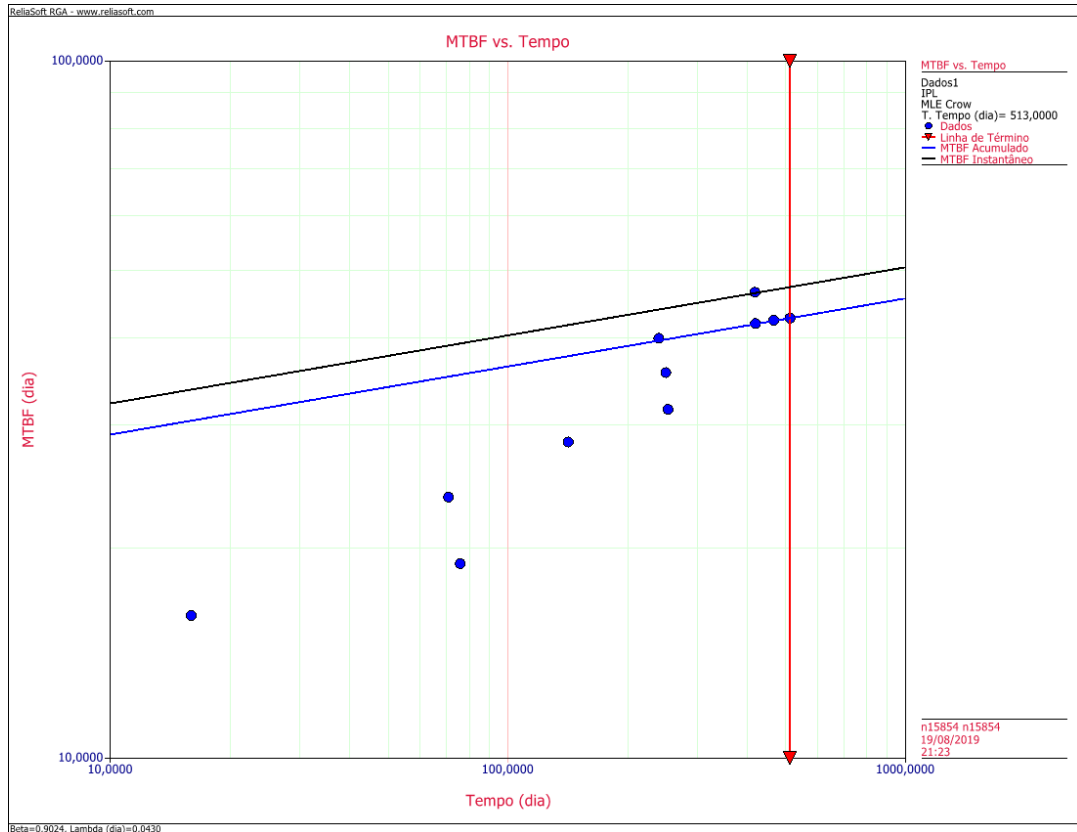


Fonte: o autor (2019), a partir do *software* RGA.

É possível que, naquele período, os efeitos resultantes da alteração dos planos de manutenção ainda não fossem perceptíveis ou que outros modos de falha não associados ao sistema de refrigeração tivessem se manifestado. O coeficiente  $\beta$  (Beta) para esta análise foi 1,1920. Como  $\beta > 1$ , esse resultado denota diminuição do MTBF e decréscimo da confiabilidade.

Acrescentando-se à avaliação os dados de 2011 (Gráfico 4.2), observa-se alteração da curva, evidenciando o crescimento do MTBF e a confiabilidade do sistema.

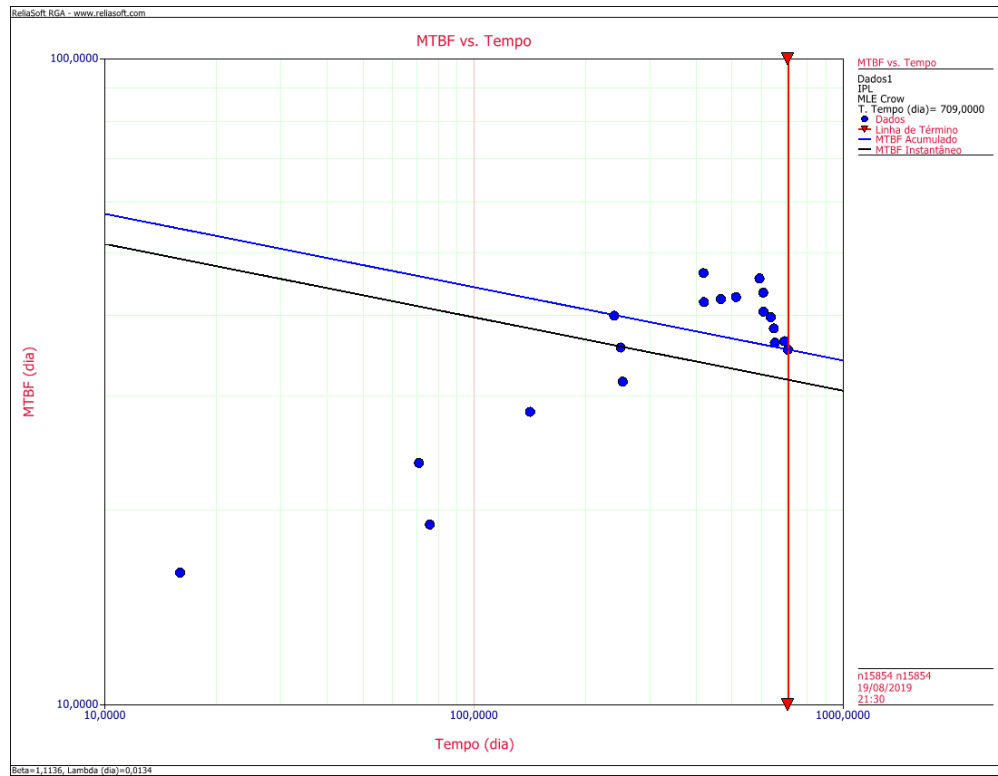
Gráfico 4.2 – MTBF em função do tempo (2011)



Fonte: o autor (2019), a partir do *software* RGA.

Nesta etapa, foi obtido  $\beta = 0,9024$ . Entretanto, decorrido apenas um ano de implantação da MCC, ainda não se pode afirmar que a confiabilidade do sistema havia aumentado. Em 2012, conforme Gráfico 4.3, observou-se outro decréscimo da confiabilidade do sistema, uma vez que, na simulação, obteve-se  $\beta = 1,1136$ .

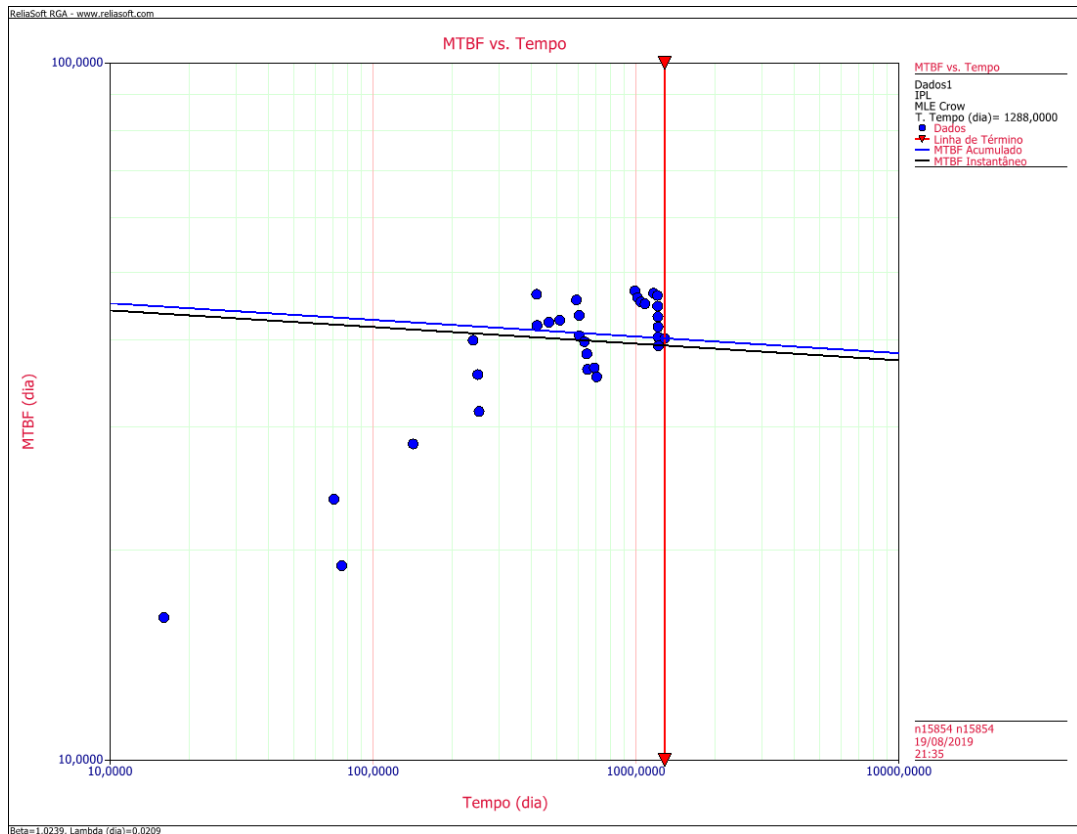
Gráfico 4.3 – MTBF em função do tempo (2012)



Fonte: o autor (2019), a partir do *software* RGA.

Mesma tendência foi observada na análise de 2013 (Gráfico 4.4), entretanto, com ligeiro decréscimo do coeficiente  $\beta$ , que passou para 1,0239.

Gráfico 4.4 – MTBF em função do tempo (2013)



Fonte: o autor (2019), a partir do *software* RGA.

Assim, com base na análise dos dados até 2013, não se pode afirmar que as ações implantadas em 2010 foram eficazes, a ponto de aumentar a confiabilidade do sistema, representado pelo forno de indução.

A tendência de aumento na confiabilidade se consolida nos anos subsequentes. A Tabela 4.2 mostra a redução do coeficiente  $\beta$ , partindo de 2013, quando ela se iniciou, mesmo que de forma tímida, a 2018. Os dados comprovam o crescimento da confiabilidade no período.

Tabela 4.2 – Evolução do coeficiente  $\beta$  (2013-2018)

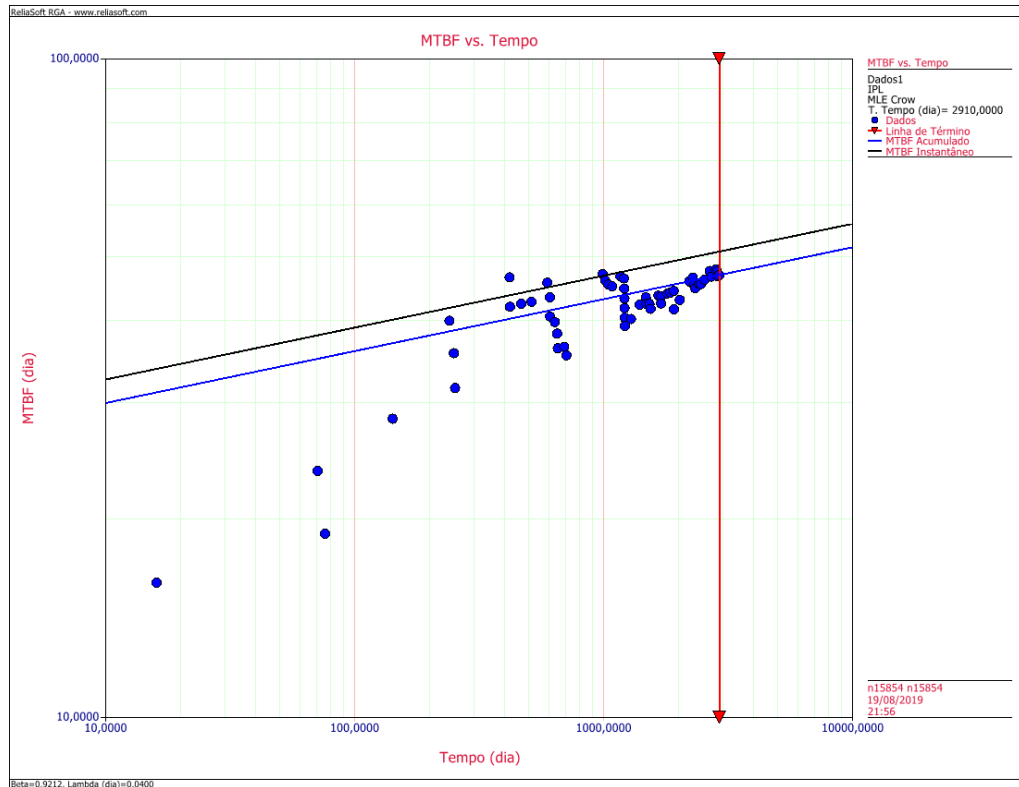
Ano	2013	2014	2015	2016	2017	2018
$\beta$	1,0239	0,9522	0,9752	0,9462	0,9197	0,9212

Fonte: o autor (2019), a partir do *software* RGA.

A Tabela 4.2 evidencia que, a partir de 2014, o parâmetro  $\beta$  chegou a valores de  $\beta < 1$ , o que significa taxa de falhas decrescente.

O Gráfico 4.5, a seguir, mostra o comportamento do MTBF durante todo o período analisado (2010-2019), destacando seu aumento.

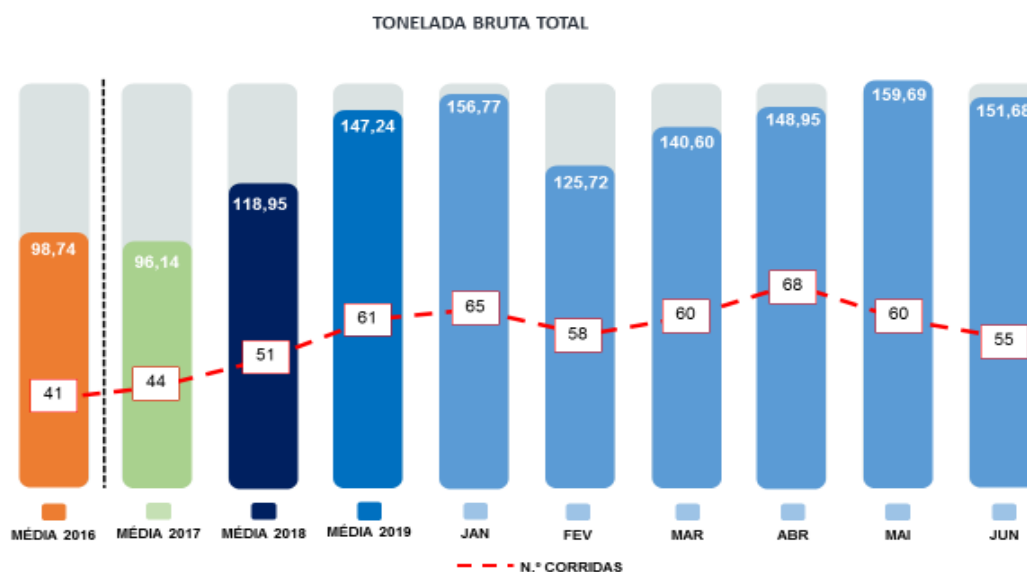
Gráfico 4.5 – Evolução do MTBF em função do tempo (2010-2018)



Fonte: o autor (2019), a partir do *software* RGA.

No Gráfico 4.5, a curva se mostra crescente, o que significa que o MTBF aumenta com o decorrer do tempo, ou seja, de modo que as falhas ficam mais espaçadas, indicando que o sistema está tendo melhor desempenho. Vale ressaltar que, a partir de 2016, o forno de indução da ArcelorMittal Tubarão teve sua produção aumentada em cerca de 49%, conforme se observa no Gráfico 4.6.

Gráfico 4.6 – Produção da fundição de peças



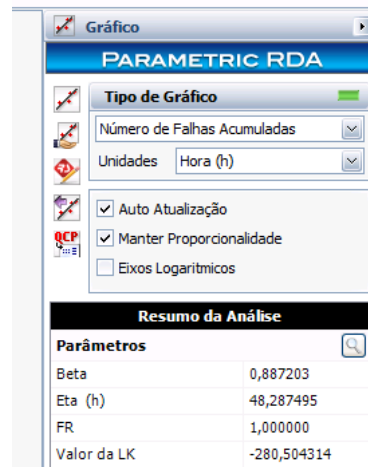
Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2019).

No Gráfico 4.6, observa-se que o volume de material fundido aumentou a partir de 2017 e, em 2019, segue o mesmo comportamento, já que, ao longo dos meses abarcados nesta análise, constata-se elevação da produção média anual em 23,78% em relação a 2018. Se a comparação for feita em relação ao ano de 2016, o aumento é de 49,11%. Isso evidencia que o equipamento foi mais exigido em sua produção, correspondendo satisfatoriamente ao aumento da demanda.

Desse modo, destaca-se para exame a seguinte questão: que evento teria ocorrido no equipamento após 2013, que contribuiu para o crescimento da confiabilidade no período em análise? O especialista da área, ao ser apresentado a esse questionamento, mencionou alguns fatores que foram observados após a implantação da MCC, mas que não foram abordados durante o mesmo processo. Entre esses fatores, destacam-se a padronização de sobressalentes, a qualificação de fornecedores e a quantidade de revisões nos planos de inspeção, as quais passaram a abranger outros itens do forno e a considerar outros modos de falhas.

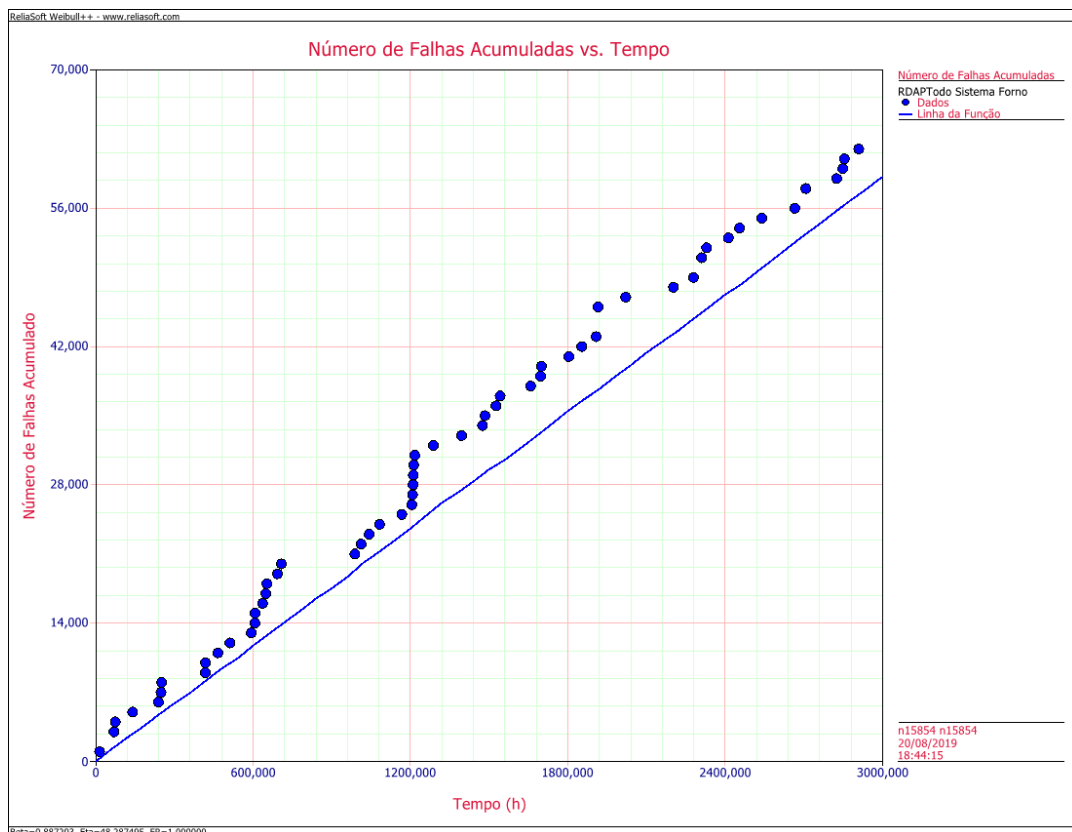
Uma análise complementar foi realizada utilizando-se a distribuição *Weibull* para determinar se os reparos, mesmo feitos em emergência/urgência, reestabeleceram a condição do sistema. Os parâmetros também foram obtidos por meio da aplicação *Weibull++*, também da *Reliasoft*. A Figura 4.1 mostra a evolução das falhas no tempo.

Figura 4.1 – Evolução das falhas no tempo



Fonte: o autor (2019), a partir do *Weibull ++*.

Gráfico 4.7 – Falhas Acumuladas x Tempo (2010-2019)



Fonte: o autor (2019), a partir do *software RGA*.

Os parâmetros obtidos nesta análise foram:  $\beta = 0,8872$ ,  $\text{Eta (h)} = 48,28$  e  $\text{FR} = 1$ . Como  $\beta < 1$ , tem-se, portanto, taxa de falhas decrescente.

Um fator de restauração de 1 (100%) indica que o componente será tão bom quanto novo após o reparo, cujo efeito implicará que a idade inicial do componente se inicie em 0.

## 4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados de falha obtidos referem-se ao período de 02/06/2010 a 21/05/2018, considerando-se o MTBF associado ao parâmetro de forma  $\beta$  como medidas para avaliar o crescimento da confiabilidade no recorte temporal mencionado.

Inicialmente, foi considerado o ano 2010 para análise, sendo constatado  $\beta = 1,920$ , o que denota diminuição do MTBF, logo, decréscimo da confiabilidade. O próximo período analisado foi o ano de 2011, que, apesar de apresentar  $\beta = 0,9024$ , ainda não permitia afirmar que as alterações no plano de manutenção do forno de indução já apresentavam aumento na confiabilidade. Análises dos anos subsequentes, 2012 e 2013, também apresentaram  $\beta > 0$ , ou seja, diminuição do MTBF, o que já sinalizava decréscimo da confiabilidade no período.

Esses resultados suscitaram dúvida sobre se a implantação da MCC abordando somente o sistema de refrigeração, realizada em 2010, teria sido a melhor decisão. Entretanto, a partir de 2013 até o ano de 2019, o MTBF aumentou e o fator de forma diminuiu, o que evidencia o aumento da confiabilidade.

É importante ressaltar que, em 2014, novas ações foram implementadas, incluindo, principalmente, a revisão dos planos de manutenção, também programadas para os sistemas mecânico e elétrico, e não apenas para o sistema de refrigeração.

Análise complementar também foi realizada utilizando-se a distribuição *Weibull* para determinar se os reparos, mesmo feitos em emergência/urgência, reestabeleceram a condição do sistema, sendo que o resultado obtido comprovou o crescimento da confiabilidade a partir de 2014.



## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho examinou o comportamento do forno de indução da oficina de fundição da ArcelorMittal Tubarão, no que diz respeito à sua confiabilidade após a implantação da MCC, em 2010.

A avaliação se deu a partir da análise do comportamento do MTBF por intervalos anuais, utilizando-se, para tanto, o *software* RGA, da *Reliasoft*. Uma análise complementar também foi realizada utilizando-se, para tanto, a distribuição *Weibull*, objetivando determinar se os reparos, mesmo feitos em emergência/urgência, reestabeleceram a condição do sistema.

Durante o desenvolvimento do estudo, observou-se que o crescimento efetivo da confiabilidade somente aconteceu três anos após a implantação. A razão para a implantação da MCC não ter obtido o resultado esperado nos primeiros anos de sua aplicação não foi considerada nesta avaliação. Entretanto, investigou-se o motivo do aumento de confiabilidade após o terceiro ano de aplicação do referido método. Isso feito, ficou constatado que novas ações foram implementadas, incluindo, principalmente, a revisão dos planos de manutenção, abrangendo, além do sistema de refrigeração, os sistemas mecânico e elétrico.

Salienta-se que o trabalho desenvolvido por Vieira (2010) foi dirigido somente para o sistema de refrigeração de água externa do equipamento forno de indução. O presente estudo, entretanto, considerou todos os demais modos de falha associados aos demais sistemas.

### 5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser usado como ponto de partida para outros estudos que possam contribuir para a melhoria da confiabilidade do forno de indução. Com esse entendimento, sugere-se investigar falhas potenciais, que, mesmo não tendo ocorrido até o presente momento, necessitam de ações de mitigação, a fim de evitar que venham a se manifestar. Sugere-se, inclusive, acrescentar análises associadas aos modos de falhas.

## REFERÊNCIAS

- A ARCELORMITTAL Tubarão no Espírito Santo. Serra: Gerência de Comunicação e Imagem, 2017. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/sala-imprensa/publicacoes-relatorios/tubarao/sumario---a-arcelormittal-tubarao-no-espirito-santo-2017>>. Acesso em: 14 ago. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade – terminologia. Rio de Janeiro, 2004.
- ALMEIDA, A. T. de; SOUZA, F. M. C. **Gestão da manutenção**: na direção da competitividade. Editora Universitária da UFPE, 2001.
- ARCELORMITTAL TUBARÃO. **Procedimento interno para manutenção de fornos de indução**. 2010. Padrão interno baseado em instruções do fabricante – Inductotherm.
- ASTOLPHO, F. *et al.* Regionalização de riscos de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais para o Estado de São Paulo com base em modelos probabilísticos e digitais de elevação. **Bragantia**, v. 64, n. 01, p. 139-148, 2005.
- BRANCO FILHO, G. **Indicadores e índices de manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2006.
- CAPETTI, E. J. O Papel da gestão da manutenção no desenvolvimento da estratégia de manufatura. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.
- FAGUNDES, A. *et al.* Estudo de caso: análise quantitativa de confiabilidade e disponibilidade de um torno CNC, baseado na metodologia RCM (Reliability Centred Maintenance), aplicado à área de manutenção industrial. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Abepro, 2011.
- GIL, Antônio C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- HERRMANN, L. **Estimação de curvas de sobrevivência para estudos de custo-efetividade**. Monografia (Bacharel em Estatística) – Instituto de Matemática, Departamento de Estatística, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- O QUE É INDUÇÃO? Disponível em: <<https://inductothermgroup.com.br/o-que-e-inducao/>>. Acesso em: 12 jul. 2019.
- PINTO, A. K.; LAFRAIA, J. R. **Gestão estratégica e confiabilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

RÉGIS, M. R. de C. S. **Memórias de migrantes em Aracruz/ES: análise das transformações psicossociais e urbanas 1970-2010.** 151 f. Dissertação (Mestrado em Psicologia) – Pós-graduação em Psicologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016. Disponível em: <<https://tede.ufrj.br/jspui/bitstream/jspui/2103/2/2016%20-%20Maria%20Rita%20de%20C%3%A1ssia%20Sales%20R%3%A9gis.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Produção**, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005.

SIQUEIRA, I. P. de. **Manutenção centrada na confiabilidade:** manual de implementação. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

VIEIRA, Aureliano B. **Proposta de otimização do plano de manutenção do forno de indução da oficina de fundição da ArcelorMittal Tubarão, com aplicação da filosofia da manutenção centrada em confiabilidade e verificação de potenciais de ganho.** Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Manutenção) – Faculdade Brasileira, Vitória, 2010.

WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. **ASME Journal of Applied Mechanics**, p. 293-297, sep. 1951.

YANG, C. et al. A study on applying FMEA to improving ERP introduction an example of semiconductor related industries in Taiwan. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 23, n. 3, p. 298-322, 2006.