

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

EDUARDO DE OLIVEIRA BELO

ANÁLISE DE FALHAS DOS EQUIPAMENTOS DE UM ALTO FORNO

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2019

EDUARDO DE OLIVEIRA BELO

ANÁLISE DE FALHAS DOS EQUIPAMENTOS DE UM ALTO FORNO

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. Carlos Henrique Mariano

CURITIBA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE FALHAS DOS EQUIPAMENTOS DE UM ALTO FORNO

por

EDUARDO DE OLIVEIRA BELO

Esta monografia foi apresentada em 04 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Carlos Henrique Mariano
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Emerson Rigoni
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Wanderson Stael Paris
Membro Titular da Banca – UTFPR

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

Dedico este trabalho a minha esposa Ludimila Belo e aos meus familiares pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha carreira e principalmente da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por sempre ter nos dado força para prosseguir, acima de tudo com sabedoria e entendimento. Aos meus queridos pais, por sempre ter-me conduzido no caminho da educação, sempre com muito amor. Ao corpo docente e discente desta universidade. Ao corpo gerencial da ArcelorMittal Tubarão pela oportunidade cedida de realizar parte deste trabalho acadêmico no âmbito de suas instalações. Em especial minha mãe Marilza por sempre me incentivar e me fazer acreditar que era possível. Agradeço também a minha esposa Ludimila Belo por percorrermos juntos o caminho até aqui.

RESUMO

BELO, E.O. **Análise de falhas dos equipamentos de um Alto Forno.** 2019. 74. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Com a alta competitividade mundial do setor siderúrgico e principalmente o volume de produção em larga escala de grandes potências como China e EUA, se faz necessário reduzir custos de forma estratégica e aumentar a estabilidade dos processos produtivos. Para alcançar os índices de crescimento e produtividade desejados, a eficácia da manutenção aplicada ao processo produtivo mostra-se indispensável. O conjunto das manutenções preventiva, preditiva e corretiva, se planejado de forma adequada, tende a reduzir o grande número de falhas de equipamentos aumentando confiabilidade e disponibilidade dos ativos, maximizando os resultados e reduzindo custos. Devido diversas ocorrências de falhas de um Alto Forno em 2018 e constantes perdas de produção, será aplicado neste estudo a metodologia do RCM – Reliability Centered Maintenance para analisar a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade dos equipamentos, a fim de reduzir o índice de falhas dos ativos.

Palavras-chave: Confiabilidade. RCM. Alto Forno. Ativos. Manutenção. Falha.

ABSTRACT

BELO, E.O. Failure analysis of blast furnace equipment. 2019. 74. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

With the global competitiveness increasing in the steel industry and large-scale production by large countries such as China and USA, it is necessary to reduce costs in a smart and strategical manner in order to stabilize the production. To achieve these metrics of growth and productivity, efficiency in the execution of maintenance applied to the production is indispensable. If predictive, preventive and corrective maintenance is planned and executed correctly, the number of equipment failures tends to decrease significantly, increasing asset reliability and availability, which will in return, help maximize the results while simultaneously minimizing costs.

Due to various occurrences of equipment failure in the blast furnace in 2018 and constant loss of production, it will be applied in this study the RCM method (Reliability Centered Maintenance) to better analyze how the maintenance is performed with the objective of reducing the asset failure rate.

Key-Words: Reliability. RCM. Blast Furnace. Assets. Maintenance. Failure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de Produção da ArcelorMittal Tubarão Fase 7,5 Mt/ano.	18
Figura 2 - Zonas Internas de um Alto Forno.....	20
Figura 3 - Composição da planta	21
Figura 4 – Sistema de carregamento do alto forno	22
Figura 5 – Sistema de topo do alto forno	24
Figura 6 – Equipamento para perfuração	26
Figura 7 - Processo de furo	27
Figura 8 – Desenho esquemático do Sistema de “Stave Cooler”	27
Figura 9 – Sistema de refrigeração “Stave Cooler” de um alto forno	28
Figura 10 – Sistema dos regeneradores	29
Figura 11 - Representação sistemática dos regeneradores	30
Figura 12 – Sistema típico de lavagem de gás.....	31
Figura 13 – Planta de moagem e injeção	33
Figura 14 – Injeção de carvão	34
Figura 15 - Evolução da Manutenção.....	36
Figura 16 - Relação Gráfica entre parâmetros de confiabilidade	48
Figura 17 - Relação entre Disponibilidade e a Situação do Componente.	50
Figura 18 - Curva confiabilidade versus não confiabilidade	50
Figura 19 - Tipos de curvas de falha	52
Figura 20 - Curva da banheira.....	52
Figura 21 - Diagrama de blocos funcionais	54
Figura 22 - Revisão do cadastro e classificação dos equipamentos	55
Figura 23 – Classificação dos equipamentos	58
Figura 24 - Planilha FMEA PT.1	62
Figura 25 - Planilha FMEA PT.2.....	63
Figura 26 – Planilha FMEA PT.3	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – RVS acumulada.....	66
Gráfico 2 – Ocorrências de turno 2015 ~2019.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução da Manutenção	38
Tabela 2 - Custo por tipo de manutenção	41
Tabela 3 - Comparação da Manutenção Tradicional com a MCC.....	43
Tabela 4 - Critério de criticidade para equipamentos	56
Tabela 5 - Fator de Correção para Faixa de Criticidade	57
Tabela 6 - Classificação Final de Criticidade.....	57
Tabela 7 – Análise de Modos de Falha e Efeitos para Equipamentos – FMEA	58
Tabela 8 - Tabela de Severidade	59
Tabela 9 – Tabela de Probabilidade e Ocorrência	60
Tabela 10 – Tabela de Probabilidade de Detecção.....	60

LISTA DE SIGLAS

BF	Blast Furnace
RCM	Reliability Centered Maintenance
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
TMEF	Tempo médio entre falhas
TMPF	Tempo médio para falha
TMPR	Tempo médio para reparo
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
DFMEA	Design Failure Modes and Effects Analysis
PFMEA	Process Failure Modes and Effects Analysis
DBF	Diagrama de blocos funcionais
RVS	Redução do Volume de Sopro

LISTA DE SÍMBOLOS

λ - Lambda
 β - Beta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVAS	15
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTOS DO PROCESSO SIDERÚRGICO	17
2.1	VISÃO GERAL DO PROCESSO SIDERÚRGICO	17
2.2	PROCESSO DO FORNO	18
2.3	PRINCIPAIS ÁREAS DE UM ALTO FORNO	21
2.3.1	Carregamento	21
2.3.2	Topo do Alto Forno	23
2.3.3	Casa de Corrida	25
2.3.4	Sistema de refrigeração da carcaça (Staves)	27
2.3.5	Regeneradores	29
2.3.6	Sistema de Limpeza de Gás	31
2.3.7	Sistema de moagem e injeção de carvão	32
3	REFERENCIAL TEÓRICO	35
3.1	MANUTENÇÃO	35
3.1.1	Manutenção Corretiva	39
3.1.2	Manutenção Preventiva	39
3.1.3	Manutenção Preditiva	40
3.1.4	Mantabilidade e disponibilidade	40
3.2	RCM (RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE)	42
3.3	PLANOS DE MANUTENÇÃO	43
3.4	FMEA - ANÁLISE DE MÓDOS DE FALHA E EFEITOS	44
3.4.1	Confiabilidade	46
3.4.2	Ferramentas Matemáticas	47
3.4.3	Curva da Banheira	51
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA RCM AO PROCESSO	54
4.1	CRIAÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAIS (DBF)	54
4.2	REVISÃO DO CADASTRO	55
4.3	ANÁLISE DA CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS	55
4.4	REVISÃO DOS EQUIPAMENTOS NÃO CRÍTICOS	64
4.5	CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO	64
5	RESULTADOS	65
6	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES	67
7	REFERÊNCIAS	68
8	ANEXO I	70

1 INTRODUÇÃO

Em um mercado altamente competitivo, globalizado e muito dinâmico, onde a busca por boas práticas que conduzem uma organização na linha da produtividade, qualidade e respeito ao meio ambiente são fatores diferenciais para a sustentabilidade das empresas. Esta que também pode e deve ser alcançada com técnicas de manutenções que quando estão alinhadas com a cadeia produtiva geram significativos retornos.

As empresas atualmente procuram as melhores práticas de manutenção devido a alguns fatores, dentre eles: o custo de manutenção gira em torno de 4% a 15% do custo de produção, sendo que 1/3 destes custos são desnecessários, e boas práticas de manutenções podem maximizar em 30% a utilização de ativos, aumentando a produtividade da empresa (PIRES, 2012).

A exigência pela garantia da qualidade dos produtos, o cumprimento dos requisitos ambientais e de segurança e o baixo custo de manutenção, são grandes desafios quando se busca aumento de desempenho dos equipamentos.

Neste contexto a manutenção pode contribuir para que a empresa atenda o mercado de forma mais competitiva, proporcionando equipamentos mais disponíveis, confiáveis e com custos adequados. E é com foco na manutenção que este trabalho será desenvolvido, onde será realizada uma análise sobre os equipamentos de um Alto Forno, área essencial para o processo siderúrgico. Será feita uma análise geral utilizando a metodologia do RCM (Reliability Centered Maintenance) auxiliada por uma análise FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) visando a identificação dos pontos críticos para atuação. A assertividade na identificação dos principais pontos de falha é essencial para a otimização dos índices de manutenção e, conseqüentemente, melhores resultados operacionais e produtivos.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

O problema a ser estudado está relacionado à confiabilidade dos equipamentos do processo produtivo de um Alto Forno, cujo o número de falhas nos equipamentos impacta diretamente a performance operacional e produtiva da planta. Nesse contexto acredita-se que há potencial de elevação do nível de confiabilidade do processo como um todo utilizando a metodologia do RCM, trazendo benefícios à organização em termos de lucratividade. Dessa hipótese surge a questão principal

norteadora desse trabalho: **Como a metodologia do RCM aplicada ao processo produtivo pode aumentar a confiabilidade de um Alto Forno?**

Decorrentes desta questão principal, podemos verificar duas questões subjacentes cujas respostas possibilitam o cumprimento do objetivo geral deste trabalho:

- **Como determinar indicadores de referência para estabelecer os principais pontos de falha dos equipamentos?**
- **Com a aplicação do RCM há potencial de incremento da confiabilidade da planta estabelecendo um novo patamar de disponibilidade dos equipamentos.**

Pretende-se, com a metodologia proposta neste estudo, contribuir para a elevação da disponibilidade dos equipamentos de forma a responder à questão apresentada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a confiabilidade do conjunto de equipamentos de um Alto Forno e propor melhorias baseadas na implantação do Reliability Centered Maintenance (RCM), visando aumento de disponibilidade dos mesmos. Assim sendo, propõe-se a verificação quantitativa dos níveis atuais de confiabilidade e, através da aplicação da metodologia proposta, sugerir ações para estabelecimento de um novo patamar, elevando o desempenho do conjunto estudado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Conhecer a disponibilidade de um sistema levando em consideração os modelos de confiabilidade e manutenibilidade de componente;
- Aplicar os conceitos de engenharia de confiabilidade na tomada de decisão;
- Conhecer a performance atual dos equipamentos e propor ações para aumentar os índices de disponibilidades;

- Aumentar a confiabilidade dos equipamentos críticos permitindo alcançar ciclos entre paradas programadas;
- Apresentar os riscos e ganhos envolvidos;

1.3 JUSTIFICATIVAS

Os equipamentos de um Alto Forno são extremamente solicitados e devem ter alto índice de confiabilidade para não interferir de forma negativa no processo de produção do ferro gusa, principal produto de um Alto Forno. De forma geral temos em uma Alto Forno diversos tipos de equipamentos em diversas sub-áreas.

O acontecimento de falhas pode gerar diversos distúrbios no processo, como redução do volume soprado para o interior do Alto Forno, arreamentos de carga, resfriamento e paradas emergências da unidade. Todos os tipos de ocorrências citados acima podem gerar emissões fugitivas e também oferecer risco ao homem. Com o intuito de elevar a produção de gusa e controlar todos os impactos negativos para o Alto Forno, se faz necessário aumentar a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade dos equipamentos.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos aplicados neste estudo são classificados como de natureza tecnológica aplicada, com objetivo descritivo e exploratório, abordagem quantitativa e qualitativa e procedimento com base em pesquisa e ação.

Segundo o Manual Frascati (2002), as atividades de inovação tecnológica são o conjunto de diligências científicas, tecnológicas, organizacionais, financeiras e comerciais, que se destinam a levar a realização de produtos e processos tecnologicamente novos e melhores.

Segundo Gil (2008) as pesquisas descritivas têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Esta tem objetivo de estudar características de um grupo: custos, falhas por exemplo. Segundo o mesmo autor citado acima, as pesquisas exploratórias têm como principal objetivo desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias.

O foco da análise qualitativa será na escolha de novas tecnologias durante o desenvolvimento do trabalho.

Segundo Thiollent (1985, p.14), este é um tipo de pesquisa social com base empírica que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo e no qual os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos do modo cooperativo ou participativo.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho se apresentará em 5 capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1: Introdução e Objetivos
- Capítulo 2: Apresentação do Tema da Pesquisa
- Capítulo 3: Referencial Teórico
- Capítulo 4: Aplicação da metodologia ao processo
- Capítulo 5: Resultados e discussões
- Capítulo 6: Conclusões e recomendações

O Capítulo 1 apresenta uma breve discussão introdutória para contextualizar o tema de pesquisa a ser desenvolvido. Neste capítulo são apresentadas as considerações sobre o tema escolhido, as premissas e o problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos do trabalho, a justificativa da pesquisa, os procedimentos metodológicos e, finalmente, a estrutura do trabalho. Já o Capítulo 2 expõe a área de aplicação da pesquisa, cujo escopo é o conjunto de equipamentos de um alto forno, unidade fabril da siderurgia mundial responsável pela produção do ferro gusa, matéria prima da produção de aço.

O capítulo 3 abordará o referencial teórico referente à engenharia de confiabilidade aplicada ao trabalho, enquanto no capítulo 4 será mostrado a aplicação da metodologia de estudo na prática do processo.

Por fim, os capítulos 5 e 6 correspondem às discussões dos resultados obtidos no decorrer da pesquisa, assim como as conclusões e recomendações para trabalhos futuros respectivamente.

2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO SIDERÚRGICO

2.1 VISÃO GERAL DO PROCESSO SIDERÚRGICO

De acordo com o instituto aço Brasil (2019), o aço é uma liga de ferro e carbono. O ferro é encontrado em toda crosta terrestre, fortemente associado ao oxigênio e à sílica. O minério de ferro é um óxido de ferro, misturado com areia fina, contendo menos de 2% de carbono e 1% de manganês e pequenas quantidades de silício, fósforo, enxofre e oxigênio. No processo siderúrgico, utiliza-se como combustível o carvão mineral, e em fornos de menor capacidade de produção, o carvão vegetal. O carvão tem dupla função na fabricação do aço sendo a primeira como combustível e a segunda como redutor, associando-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. Este processo de redução se dá em um equipamento chamado alto forno. Na área da sinterização, o minério é transformado em Sínter e após este processo é destinado ao alto forno. Nas usinas de pelletização, o minério é transformado em pelotas e também são destinadas ao alto forno. Na área da coqueria, o carvão mineral é transformado em coque que é posteriormente transportado Alto Forno para ser utilizado como principal combustível, podendo ser utilizado também o gás natural.

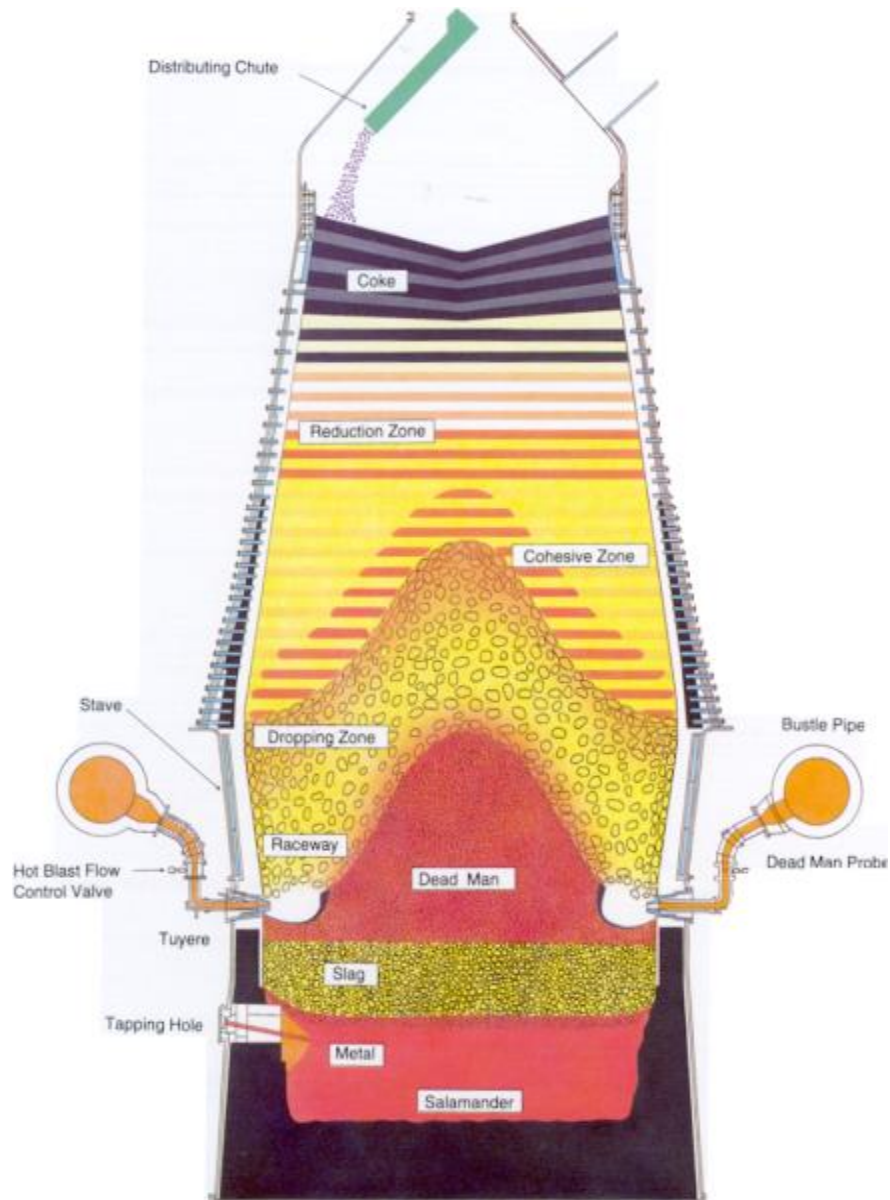
No alto forno é gerado como produtos finais o ferro líquido que é chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão além de impurezas como calcário e sílica que formam a escória, utilizada na fabricação de cimento. Após a obtenção do ferro gusa, o mesmo é transportado através de carros torpedos até a etapa seguinte do processo chamada de refino, onde será realizada a transformação do ferro em aço mediante queima de impurezas e adições. A área responsável por executar esta transformação é chamada de Aciaria. O refino do aço pode ser realizado em fornos a oxigênio ou elétricos. A última etapa de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados etc

Este estudo de caso está inserido na cadeia produtiva do aço, onde os Altos Fornos entram como alimentadores de ferro gusa no processo, tendo como áreas antecessoras basicamente Sinterização e Coqueria, e como área cliente direta, a Aciaria.

utiliza injeção auxiliar de combustíveis tais como carvão pulverizado e gás natural. A queima do coque gera gases redutores em altas temperaturas. Esses gases ascendentes em contato com a carga de minérios descendentes reagem, causando redução e fusão do minério, dando origem ao ferro gusa, que é o principal produto do Alto-Forno, e à escória. Ambos são produzidos em estado líquido em temperaturas entre 1450 e 1520°C.

Neste complexo processo, é necessário injetar ar soprado pelas ventaneiras do Alto Forno, este ar é alimentado por sopradores que fornecem ar frio a aproximadamente 150°C vindo das Centrais Termoelétricas (CTE's) e quando chega ao Alto Forno passam pelos Regeneradores, que são equipamentos providos de refratários com reserva térmica temporária para elevar a temperatura de ar soprado para até 1400°C, dependendo do processo. (KAWASSAKI STEEL, 1982)

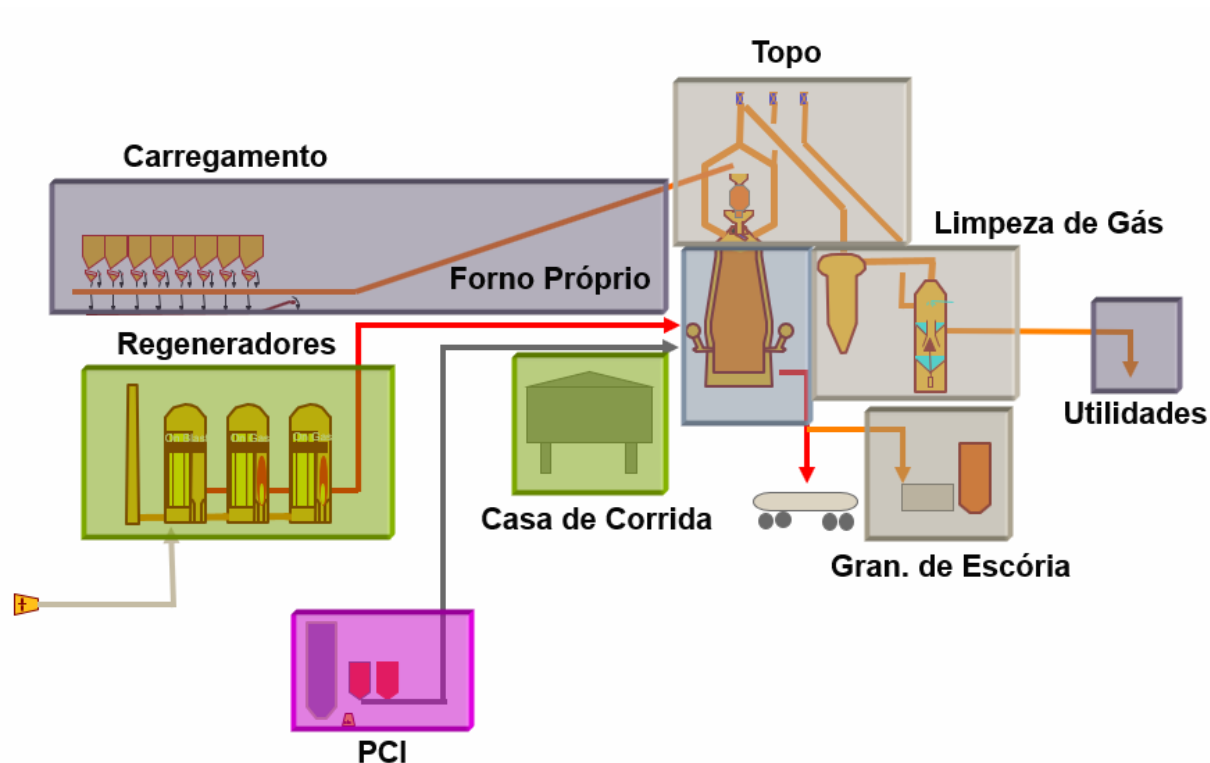
Neste caso a temperatura de sopro está na ordem de 1250°C, com vazões que podem chegar a 7500 Nm³/h e 4 kgf/cm² de pressão. Este fluxo de ar quente passa por válvulas gavetas de grande porte chamada de Válvula de Ar Quente (V.A.Q), com sedes e discos de cobre eletrolítico com alta pureza, na ordem de 99,8% de Cu, refrigerados com água desmineralizada para conservação dos componentes mecânicos citados. (KAWASSAKI STEEL, 1982)



Fonte –ArcelorMittal Tubarão (2016)

Segundo Geerdes et al. (2007) o alto forno trata-se de uma estrutura de forma cônica, distribuída em zonas conforme a Figura 2. Além disso, de forma geral, a organização geral da planta de uma usina siderúrgica pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 - Composição da planta



Fonte – ArcelorMittal Tubarão (2016)

2.3 PRINCIPAIS ÁREAS DE UM ALTO FORNO

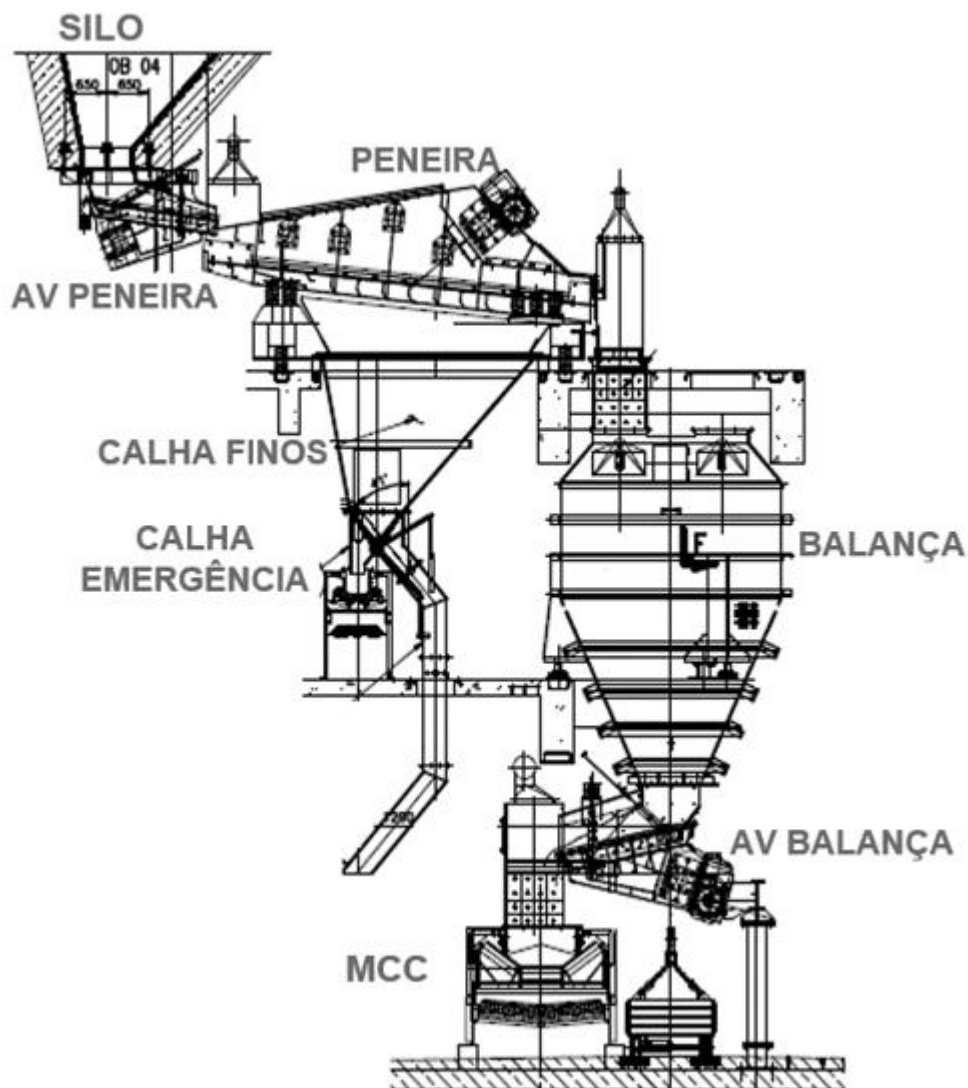
2.3.1 Carregamento

Segundo Satyendra (2016), para produzir ferro gusa, um alto forno precisa ser alimentado por matérias-primas como o sinter, minério, pelota e fundentes e por combustíveis como o coque, carvão pulverizado e gás natural. Todas estas matérias-primas exceto o carvão pulverizado e o gás natural que são injetados no forno através das ventaneiras são manuseadas na área do carregamento do alto forno. A área de carregamento consiste em dois sistemas sendo eles o de estocagem e o de transferência da matéria-prima até o topo do forno. O objetivo da área do carregamento é garantir que a matéria-prima seja entregue no interior do forno de forma controlada com quantidade, granulometria e umidade adequada de acordo com a receita elaborada pela operação.

A configuração da área do carregamento mais utilizada nas usinas siderúrgicas atuais é composta por silos de estocagem que recebem os diferentes materiais através de transportadores de correia, sistemas de alimentadores

vibratórios e peneiras individuais por silos, balanças para pesagem do material e sistema de retorno de finos utilizando transportadores de correia. Geralmente esta configuração é utilizada quando o transporte da matéria prima até o topo do forno é realizado através de um transportador de correia principal. A Figura 4 mostra um esquema básico de uma área de carregamento de um alto forno, contendo todos os principais equipamentos explicitados anteriormente.

Figura 4 – Sistema de carregamento do alto forno



Fonte: ArcelorMittal, 2015

2.3.2 Topo do Alto Forno

A distribuição de carga metálica ou de coque no interior do alto forno é realizada pelos equipamentos que compõem o topo e deve ser realizada de forma radial, utilizando granulometria correta dos materiais a fim de favorecer o escoamento gasoso e assim garantir uma boa permeabilidade. Para que as trocas térmicas e as reações de redução da carga sejam eficientes, é necessário que a distribuição de carga seja realizada de forma correta.

Basicamente as usinas siderúrgicas utilizam dois tipos de sistemas de distribuição de carga no interior dos fornos. Esses sistemas são o topo duplo cone e o topo sem cone. Devido maior flexibilidade, desempenho e confiabilidade, a calha rotativa do topo sem cone é a mais utilizada nos altos fornos modernos. Este sistema permite descarregar a carga em qualquer região na direção radial, pois, além do movimento rotativo, esta tem movimento angular em relação ao eixo central do forno.

Para um fluxo gasoso central, é necessário que a carga de coque seja direcionada no centro do forno e para um fluxo gasoso menos centralizado é necessário que direcione a carga de coque nos periféricos do forno, como no caso de remoção de cascão agregado na parede (MOURÃO et al., 2007).

De acordo com Satyendra (2013), os principais componentes do sistema de descarga de material no interior do alto forno são: equipamento de distribuição de material para tremonhas (*tilt rocker*, carro distribuidor, calha rotativa), tremonhas de recebimento de material equipadas com válvulas de selagem e controle de material, central *feeding spout*, calha rotativa com flexibilidade de giro e inclinação, sistemas hidráulicos, sistemas de lubrificação, sistemas de refrigeração e sistema de controle.

Durante operação do alto forno, o transportador de correia leva os materiais até o equipamento de distribuição que descarrega em uma tremonha que depois de cheia de material, é pressurizada a uma pressão superior a pressão interna do alto forno.

Após pressurização da tremonha, a válvula de selagem inferior e a válvula de controle de material abrem, permitindo a passagem do material até a calha rotativa que por sua vez descarrega o material no interior do alto forno. A descarga nas tremonhas é realizada de forma alternada, pois enquanto uma está sendo carregada a outra está descarregando material.

2.3.3 Casa de Corrida

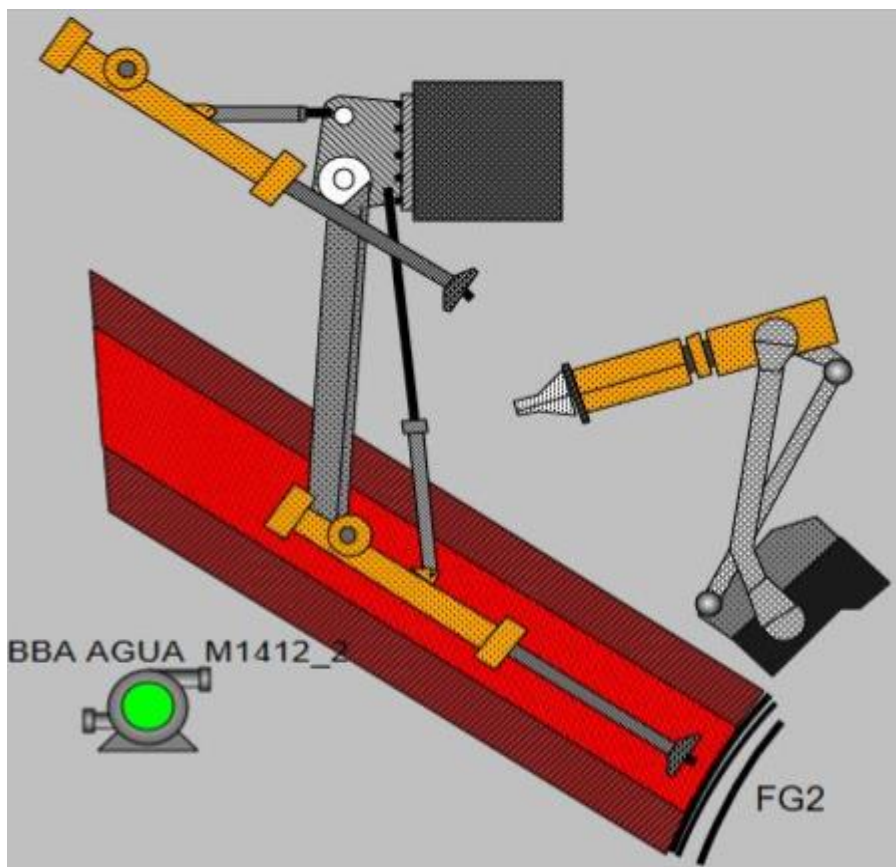
Segundo Geerdes et al., (2007) uma boa operação da casa de corrida é extremamente importante para o alto forno e para tal é necessário que a remoção do ferro e escória líquida do interior do forno seja realizada a uma taxa que não permita que o nível do metal líquido dentro do cadinho se eleve, que seja realizado uma boa separação entre ferro e escória, que ocorra um bom direcionamento do ferro líquido para o carro torpedo e o direcionamento da escória líquida para o sistema de granulação.

Os produtos finais da produção do alto forno são o ferro gusa e escória líquida. As densidades dos dois líquidos são diferentes, a do ferro são 7.2 t/m^3 enquanto a da escória é 2.4 t/m^3 proporcionando uma boa separação de líquidos no canal. A retirada regular destes líquidos do cadinho é realizada através dos furos de gusa.

O número de furos de gusa depende do tamanho e capacidade do forno. A maioria dos altos fornos no mundo possuem 2 ou 4 furos de gusa. Em uma operação normal, o furo de gusa é aberto alternadamente, uma vez em uma casa de corrida e na vez subsequente na outra casa de corrida. Os equipamentos responsáveis pela abertura e fechamento dos furos de gusa são as máquinas de perfuração e o canhão de lama, respectivamente.

De acordo com Satyendra (2014), as máquinas de perfuração devem combinar a máxima flexibilidade com o alto desempenho dos martelos e brocas de perfuração, garantindo a abertura do furo de gusa de forma efetiva. A broca deve ser suficientemente poderosa e rígida capaz de perfurar com precisão. Segundo o mesmo autor, o fechamento do furo de gusa em qualquer situação operacional é requisito para um bom desempenho operacional. A Figura 6 mostra os equipamentos principais utilizados para o procedimento de perfuração do furo de gusa.

Figura 6 – Equipamento para perfuração

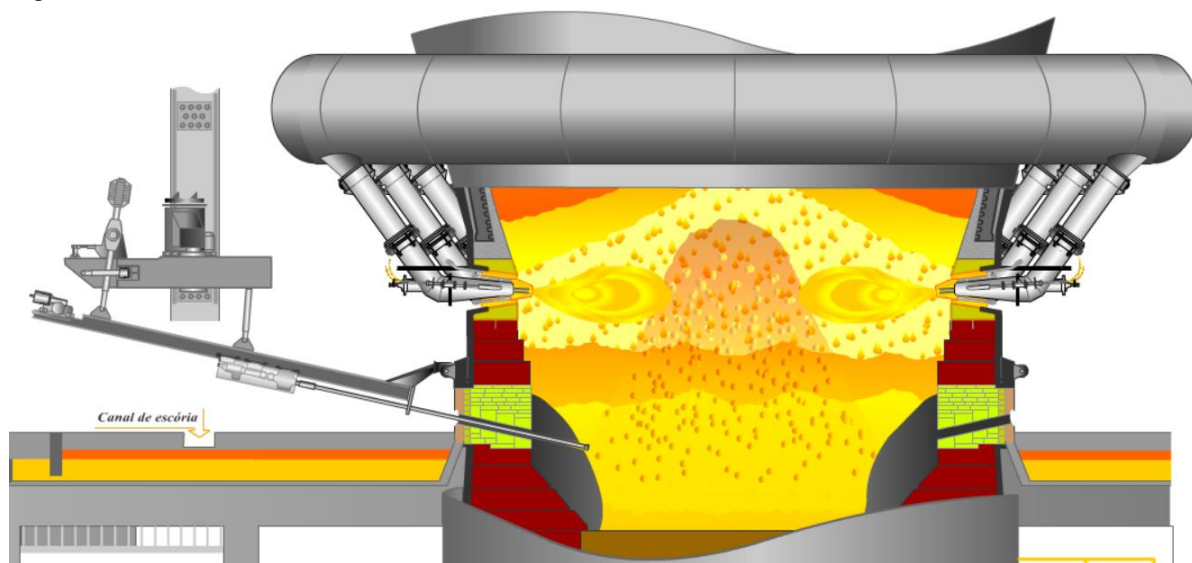


Fonte: ArcelorMittal, 2019

O equipamento responsável pelo tamponamento do furo de gusa é chamado canhão de lama. Ele tem a função de injetar massa refratária no furo de gusa a uma pressão superior a pressão do alto forno. Ambos os equipamentos podem ser operados remotamente, sendo possível serem paralisados em qualquer ponto desejado pelo operador.

A Figura 7 mostra a operação de tamponamento realizado pelo canhão de lama.

Figura 7 - Processo de furo

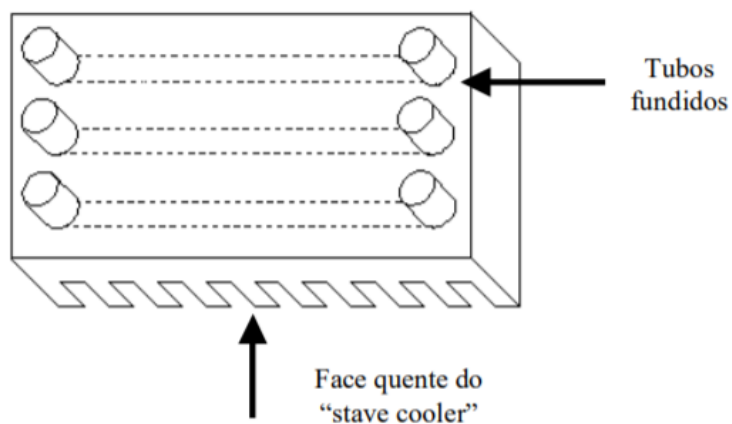


Fonte: Animação Flash Gerdau Aço Minas, 2006

2.3.4 Sistema de refrigeração da carcaça (Staves)

Os “Stave Cooler” são peças fundidas de ferro ou cobre instaladas nas paredes dos Altos Fornos, entre a carcaça e o revestimento refratário, contendo canais ou tubulações internas, também fundidos, por onde será circulada a água responsável pela refrigeração do forno, representado na Figura 8.

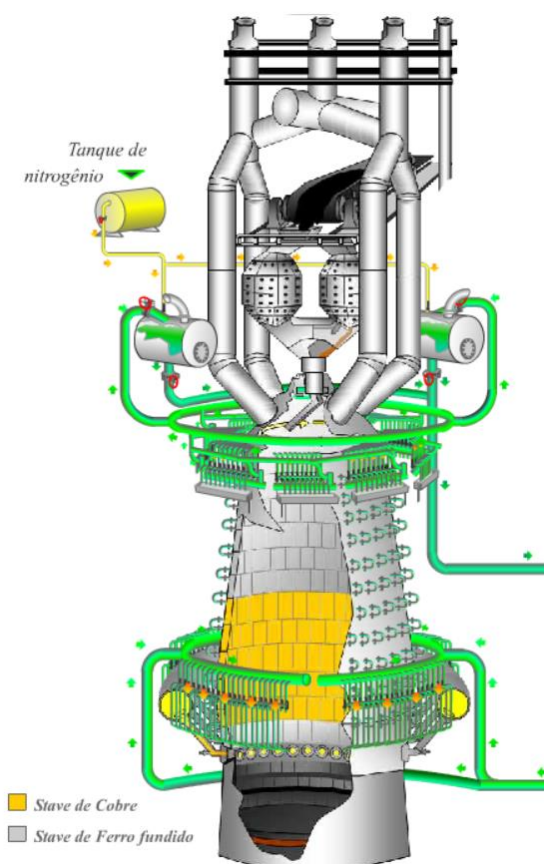
Figura 8 – Desenho esquemático do Sistema de “Stave Cooler”



Fonte: VELLOSO (2001)

Deve-se destacar que a circulação de água nos “stave cooler” é sempre feita alternando-se de “stave” para “stave” para garantir uma maior segurança ao sistema, pois caso ocorra algum furo ou rompimento, em algum tubo, será possível isolar apenas ele, de tal forma que, não se perca todo o conjunto do “stave”. A representação do sistema de stave geral de um Alto Forno pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 – Sistema de refrigeração “Stave Cooler” de um alto forno

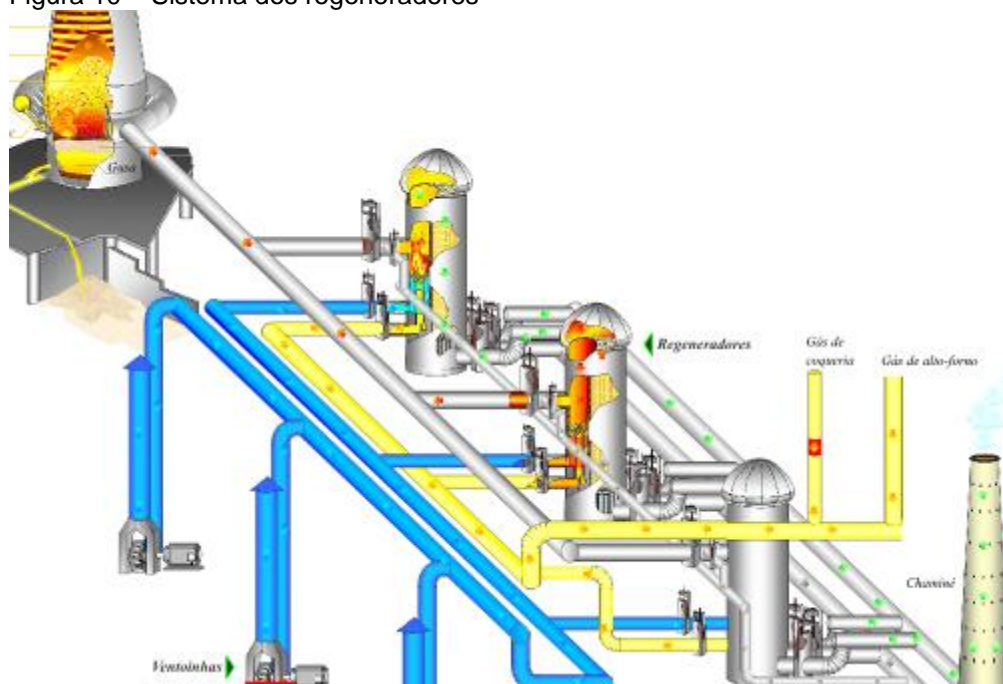


Fonte: Animação Flash Gerdau Aço Minas, 2006

2.3.5 Regeneradores

Segundo Mourão et al., (2007) os regeneradores são grandes trocadores de calor e tem como função aquecer o ar que é injetado nas ventaneiras. Estes equipamentos recebem o ar frio a uma temperatura entre 150 °C a 200 °C proveniente de turbos sopradores e o eleva a uma temperatura entre 1000 °C e 1250 °C. A Figura 10 mostra a representação esquemática do sistema de regeneradores.

Figura 10 – Sistema dos regeneradores



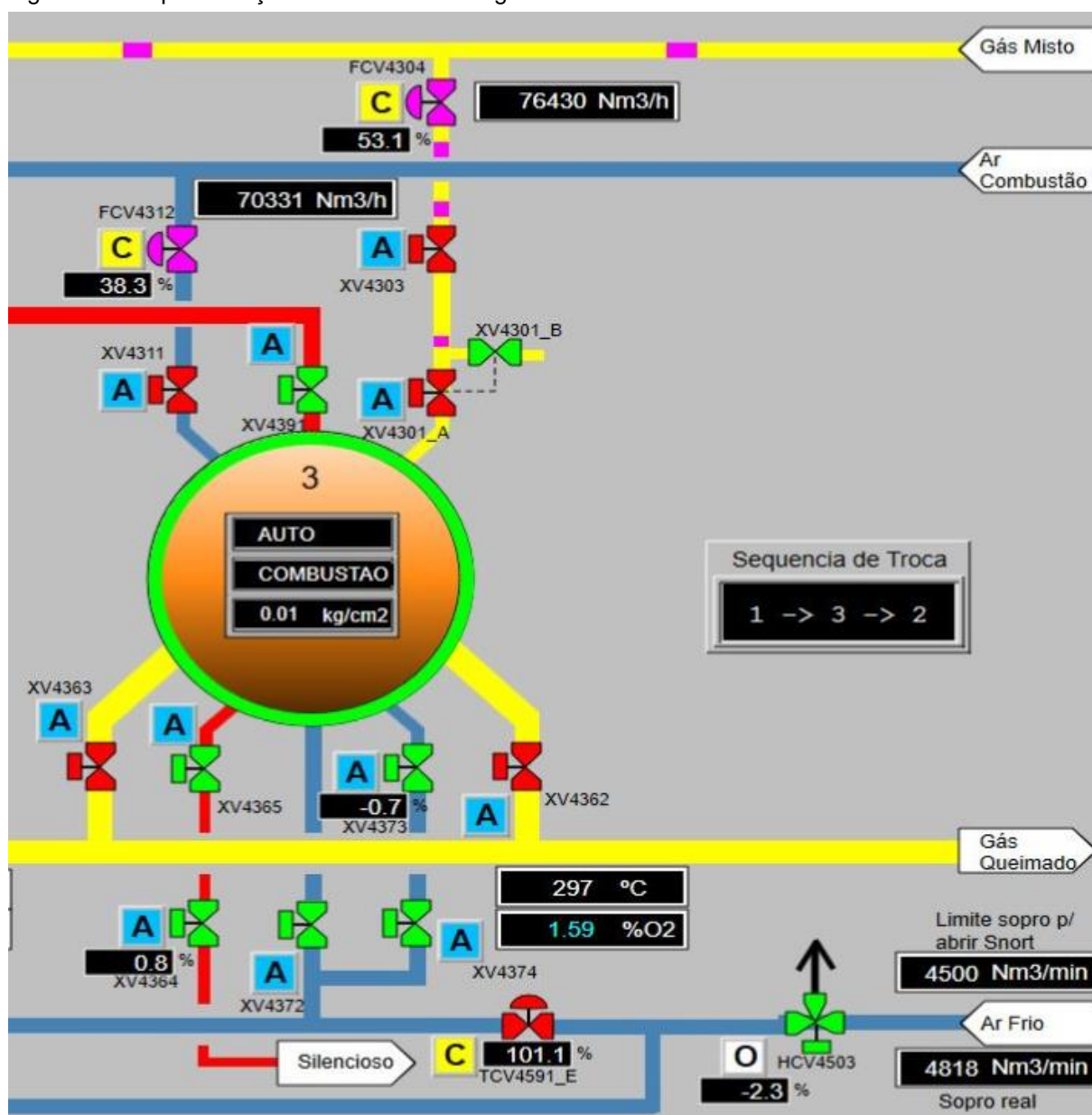
Fonte: Animação Flash Gerdau Aço Minas, 2006

O gás misto composto de uma mistura de 88% a 95% de gás proveniente do próprio alto forno (BFG) e de 5% a 12% de gás de coqueria (COG) é o combustível utilizado para se obter o aquecimento dos regeneradores. Para a realização da queima destes combustíveis, ventoinhas suprem a câmara de combustão com ar da atmosfera na concentração adequada. Na câmara de combustão é realizada a queima total do gás misto, e esta tem altura e diâmetro suficiente para evitar o impacto da chama no domo.

O domo é a parte superior do regenerador e sua função é inverter em 180° o sentido dos gases queimados e distribuí-los para o empilhamento de tijolos refratários que tem como função absorver o calor. Na etapa de sopro do

regenerador, o sentido do ar quente é inverso. Os altos fornos geralmente utilizam conjunto de três a quatro regeneradores. A Figura 11 mostra a representação do sistema de entrada e saída de ar a partir das válvulas dos regeneradores. Os regeneradores operam em ciclos, ou seja, enquanto um regenerador está em fase de combustão, os outros estão em fase de sopro. O próximo item explicará como ocorre a lavagem dos gases gerados no processo de produção de ferro gusa. A área responsável por este processo é chamada de Limpeza de Gás.

Figura 11 - Representação sistemática dos regeneradores



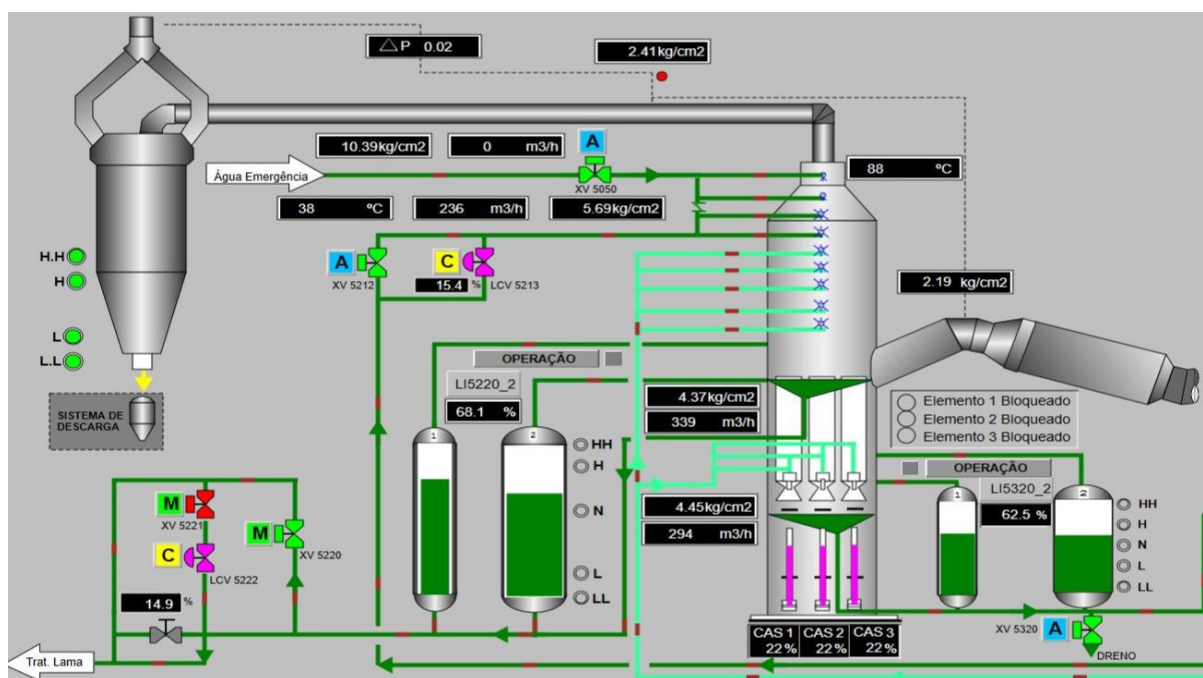
Fonte: ArcelorMittal, 2019

2.3.6 Sistema de Limpeza de Gás

De acordo com Satyendra (2016), durante o processo de produção de ferro gusa é gerado um gás no topo do alto forno, um subproduto de grande importância em todo o processo, sendo utilizado no aquecimento dos regeneradores ou suprimindo outras áreas da usina. Este gás se apresenta a uma pressão e temperatura similares as do topo do alto forno e são contaminados com partículas de pó e água. Desta maneira, é necessário que o mesmo seja passado por um processo de limpeza com objetivo de reduzir a concentração de partículas de pó.

Um sistema típico de limpeza de gás é constituído por um coletor de pó (Balão de Pó ou Ciclone), geralmente dois estágios de lavadores de gás (*Venturis Scrubbers*), válvulas de controle de pressão do topo do alto forno (*Septum Valves*), turbina a gás geradora de energia elétrica, e um desumidificador (separador de neblina). A Figura 12 representa um sistema típico de lavagem de gás.

Figura 12 – Sistema típico de lavagem de gás



Fonte: ArcelorMittal, 2019

No topo do alto forno estão localizadas tubulações chamadas de *up takes*, que são responsáveis por direcionar o gás gerado no interior do forno para uma tubulação principal de gás chamada de *Downcommer*, que é a responsável por direcionar o gás do topo do forno para o coletor de pó.

No coletor de pó as partículas mais grosseiras contidas no gás se depositam no fundo e são descarregadas em um poço através de válvulas de descarga. Posteriormente o gás é direcionado através de uma tubulação até o primeiro estágio de lavagem do gás. Nesta etapa o gás é lavado no *venturi scrubber* a partir da introdução de água nos bicos injetores e as partículas mais finas são retiradas deste equipamento em forma de lama.

Em seguida o gás é direcionado através de uma tubulação para o segundo estágio de lavagem, onde novamente ocorre a lavagem através de bicos injetores. Após esta etapa em operação normal, o gás é direcionado até a turbina para que a mesma gere energia elétrica que abastece toda a usina.

2.3.7 Sistema de moagem e injeção de carvão

Também conhecido como PCI (Pulverizing coal injection), o sistema é uma planta de moagem e injeção de carvão mineral para o alto forno em substituição ao coque para reduzir custo de produção do gusa.

São comprados cerca de 14 tipos de carvão diferentes para compor o mix de carvão que será utilizado nas moagens, observando a taxa de substituição, enxofre, percentual de cinzas e HGI (dureza do carvão). São feitas as pilhas de carvão no pátio de forma a abastecer os silos de dosagem que irão jogar o mix pronto nas correias que abastecem as moagens.

O mix de carvão é armazenado em um silo de carvão bruto que é controlado através do nível o reabastecimento. A dosagem do carvão para o moinho se dá através do transportador de arraste de carvão no qual é possível alterar a velocidade que o transportador irá abastecer o moinho. o transportador de arraste joga o carvão em um "chute" de transferência para o transportador helicoidal, que em velocidade constante joga o material em cima da mesa do moinho. O moinho trabalha com rolos movidos, ou seja, os rolos não são acionados, a mesa do moinho gira fazendo o material passar por baixo dos rolos moendo o carvão. O ventilador principal faz circular os gases no circuito passando pelo gerador de gás quente para além de transportar o pó de carvão até o silo de finos seca esse carvão.

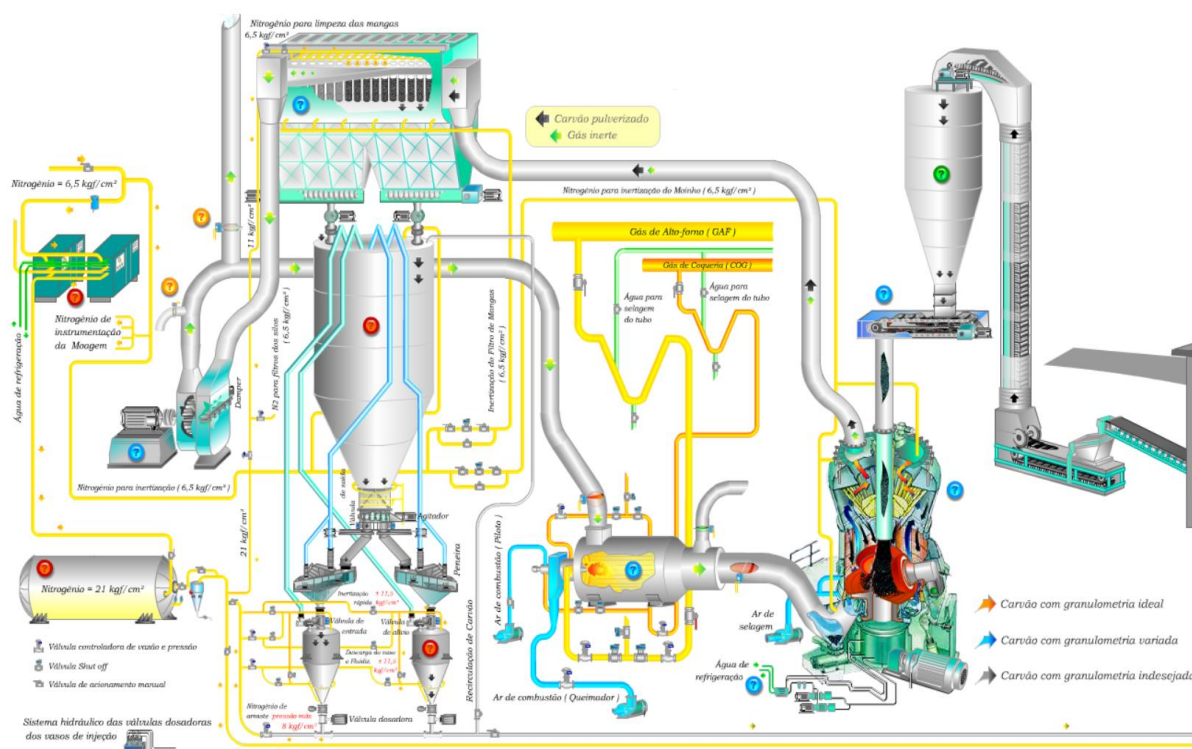
Ao entrar no moinho, o gás passa ao redor da mesa levando o material moído ao sistema de classificação e caso a partícula ainda não esteja com sua dimensão aceitável, a mesma volta para a mesa para moer novamente até estar do tamanho ideal. Após passar pelo classificador a partícula é transportada até o filtro de mangas

que irá reter o carvão pulverizado e deixar passar apenas o gás para recircular no circuito.

O filtro de mangas através de jatos pulsantes, faz com que o material caia em um transportador de arraste de finos e esse transportador joga o material em uma válvula rotativa e essa por sua vez, joga em uma peneira onde serão retiradas as impurezas residuais do carvão antes de armazenar no silo de finos.

A planta é representada na Figura 13.

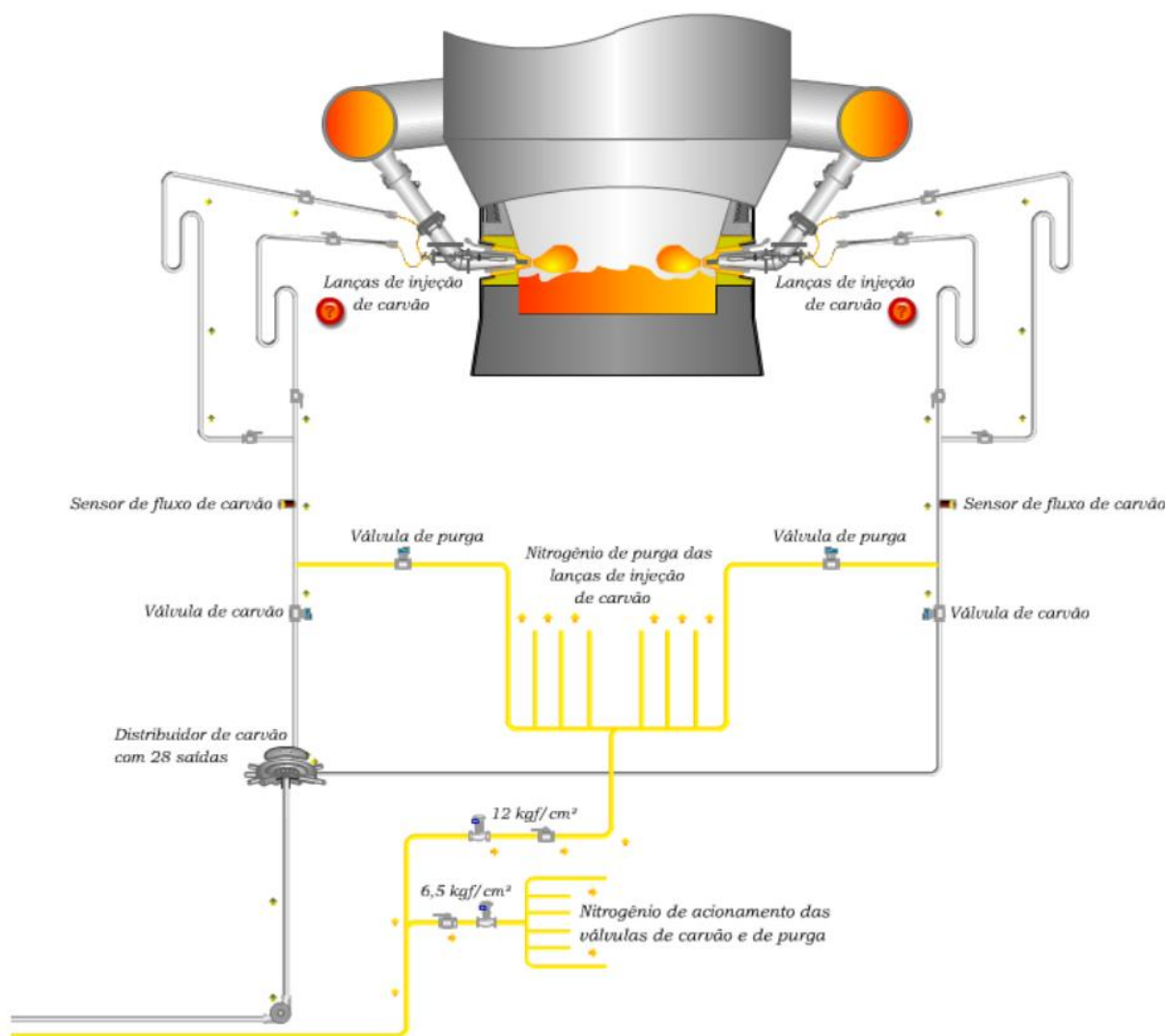
Figura 13 – Planta de moagem e injeção



Fonte: Animação Flash Gerdau Aço Minas, 2006

O material armazenado no silo de finos é descarregado nos vasos de injeção para transportar pneumáticamente os finos de carvão até as ventaneiras. O transporte é em fase densa em duas rotas par e ímpar onde um distribuidor irá dividir esse carvão igualmente de acordo com o número de ventaneiras do Alto Forno. Após igualmente distribuído, o carvão irá para as ventaneiras onde irá contribuir para a redução do material dentro do Alto Forno, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Injeção de carvão



Fonte: Animação Flash Gerdau Aço Minas, 2006

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 MANUTENÇÃO

De acordo com Monchy (1987) o termo manutenção surgiu no vocabulário militar, tendo como princípio manter nas unidades de combate, o efetivo e o material necessário em um nível constante.

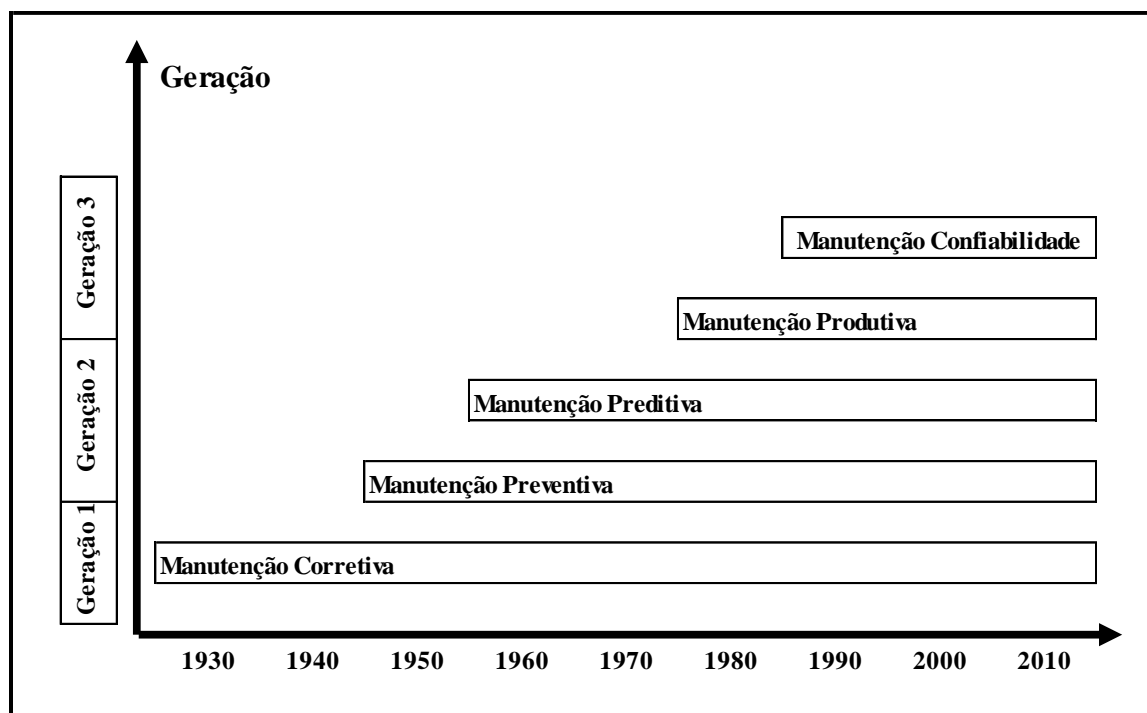
A palavra manutenção é definida por um conjunto de ações na empresa, sejam elas técnicas ou administrativas da supervisão com o intuito de manter o desempenho de um item para qual ele foi projetado. Este item pode ser qualquer parte de um sistema, componente ou unidade funcional.

De acordo com Moubray (2000) o termo manutenção no meio industrial começou a ser utilizado com a chegada da Revolução Industrial no século XVIII, na qual surgiram os meios de produção industrial. Não existia controle de qualidade para os produtos produzidos e a manutenção era muito precária, quase sempre corretiva, isso devido à falta de técnicas de diagnóstico e de prevenção da falha. Não existia manutenção sistematizada e conseqüentemente não requeria de mão de obra especializada para execução das atividades. Além disso, define que a manutenção evoluiu significativamente nos últimos vinte e sete anos, tal evolução maior que talvez, qualquer outra disciplina de gerenciamento. Isto se deve ao aumento das instalações de plantas produtivas e demanda de produtos com qualidade. Com o aumento da complexibilidade dos equipamentos, a manutenção reage cada vez mais para inibir ou prever as falhas, fortalecendo a conscientização do quanto uma falha pode afetar a qualidade de um produto impactando na confiabilidade.

Pinto e Xavier (2001) define que a manutenção passou a ser dividida em três gerações distintas a partir dos anos trinta.

A Figura 15 e Tabela 1 mostram a evolução das técnicas de manutenção em cada geração a partir da década de 1930.

Figura 15 - Evolução da Manutenção



Fonte: Siqueira (2005)

De acordo com Pinto e Xavier (2001) a primeira geração abrange o período anterior à segunda guerra mundial, período marcado por equipamentos de pouca tecnologia e mecanização, consequentemente equipamentos simples e robustos. Predominava nesta geração a manutenção corretiva, realizando apenas serviços de lubrificação, limpeza e reparos após a quebra. A segunda geração está englobada entre a segunda guerra mundial até os anos 60, quando ocorreu um aumento da demanda de muitos produtos industrializados, porém devido à guerra houve uma redução no contingente de mão-de-obra, forçando a mecanização das máquinas e aumento da complexibilidade das instalações industriais.

Ainda de acordo com Pinto e Xavier (2001) ocorreu o surgimento das gerações devido à necessidade de maior disponibilidade e confiabilidade das máquinas, visando o aumento da produção. Com uma dependência das máquinas iniciou-se as análises das falhas, surgindo então na década de 60 a intervenção para manutenção determinada por tempos, chamada de manutenção preventiva. Além disso, definem que a terceira geração esta caracterizada a partir da década de 70 quando ocorreu a aceleração de mudanças nas indústrias. Neste período ocorreu o crescimento da mecanização e consequentemente o crescimento da automação das máquinas, aumentando assim a confiabilidade e a disponibilidade das máquinas. Porém com o

aumento da mecanização e da automação, ocorreu um aumento da frequência das falhas, afetando assim os padrões de qualidade estabelecidos.

Conforme Nunes (2001), o surgimento de novas técnicas na terceira geração era suportado por computadores de grande porte, surgindo neste período sistemas de planejamento e controle da manutenção, visando melhorar e controlar as ações tomadas de manutenção. Nesta geração ocorreu o aperfeiçoamento das técnicas desenvolvidas na segunda geração e o aumento da importância da manutenção. Também foi criada na terceira fase a manutenção preditiva, auxiliada por técnicas de monitoramento sensível e instrumentos de medição.

Tabela 1 - Evolução da Manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO								
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração				
Ano								
	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	> Conserto após a falha		> Disponibilidade crescente > Maior vida útil do equipamento		> Maior confiabilidade > Maior disponibilidade > Melhor relação custo-benefício > Preservação do meio ambiente		> Maior confiabilidade > Maior disponibilidade > Prevenção do Meio ambiente > Segurança > Influir nos resultados do negócio > Gerenciar os ativos	
Visão quanto a falha do equipamento	> Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham		> Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira		> Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan & Heap e Moubray)		> Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F. (Nowlan & Heap e Moubray)	
Mudança nas técnicas de Manutenção	> Habilidades voltadas para o reparo		> Planejamento manual da manutenção > Computadores grandes e lentos > Manutenção Preventiva (por tempo)		> Monitoramento da condição > Manutenção Preditiva > Análise de risco > Computadores pequenos e rápidos > Softwares potentes > Grupos de trabalho multidisciplinares > Projetos voltados para confiabilidade > Contratação por mão de obra e serviços		> Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição > Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada > Análise de Falhas > Técnicas de confiabilidade > Manutenibilidade > Engenharia de Manutenção > Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida > Contratação por resultados	

Fonte: Pinto e Xavier (2001)

3.1.1 Manutenção Corretiva

Existem duas vertentes de manutenção corretiva, a planejada e a não planejada. A manutenção corretiva é definida como a intervenção no equipamento para correção da falha ou do desempenho abaixo do esperado. Então a manutenção corretiva não é a intervenção realizada somente em emergência. (Pinto e Xavier, 2001)

A manutenção corretiva pode corrigir ou restaurar as condições de funcionamento de um equipamento ou sistema, desta forma a manutenção corretiva não planejada é definida como a correção da falha de maneira aleatória. E a manutenção corretiva planejada é definida como a intervenção para correção do desempenho abaixo do esperado, que por decisão gerencial poderá acontecer para correção de um baixo desempenho relatado por um acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até quebrar. (Pinto e Xavier, 2001)

3.1.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva tem como objetivo reduzir ou evitar a falha ou queda de desempenho do equipamento ou processo obedecendo a um plano de manutenção previamente elaborado com base em intervalos de tempo definidos. Ao contrário da manutenção corretiva, a manutenção preventiva busca evitar a ocorrência de falhas, seu foco é a prevenção. (Pinto e Xavier, 2001)

Segundo Pinto e Xavier (2001) como a manutenção preventiva é executada com base em tempo e não por condição, alguns pontos importantes precisam ser destacados:

- A falha pode ocorrer antes de completar o ciclo inicial proposto para manutenção;
- Aberturas prematuras de equipamentos para manutenção ocorrerão no início do ciclo operacional;
- A preventiva deve ser realizada onde a preditiva não se aplica;
- Em alguns casos onde envolve segurança de pessoas e da instalação, riscos ao meio ambiente, a preventiva obrigatoriamente será realizada;
- Onde a disponibilidade operacional não permite a intervenção com facilidade a preventiva também é realizada;
- A manutenção preventiva pode inserir defeitos no equipamento devido falha humana, falha de sobressalentes, contaminações de óleo, danos

durante a partida e parada, e ou falhas dos procedimentos de manutenção.

3.1.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva comumente chamada de manutenção sob condição é definida como a intervenção realizada com base em parâmetros de condição ou desempenho onde um acompanhamento sistemático é realizado com objetivo de identificar estabilidade ou modificações nos parâmetros de funcionamento do equipamento ou processo. Quanto mais confiável for a técnica de acompanhamento das instalações, equipamentos e sistemas operacionais em funcionamento com objetivo de prevenir falhas, mais a preditiva é utilizada com potencial de permitir a operação do equipamento pelo maior tempo possível. (Pinto e Xavier, 2001)

Conforme Pinto e Xavier (2001), alguns pontos devem ser observados para que seja adotada a técnica de manutenção preditiva:

- O equipamento deve permitir algum tipo de monitoramento;
- A relação custo versus benefício deve ser favorável;
- As falhas devem possibilitar o monitoramento de acordo com o aumento da gravidade em um intervalo de tempo que permita o acompanhamento;
- Um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico sistematizado devem ser implantados.

3.1.4 Manutenibilidade e disponibilidade

Segundo Lafraia (2011) a manutenção está presente na maioria dos sistemas, necessitando de manutenções e reparos quando ocorre a falha. A manutenibilidade é definida através da facilidade na execução das atividades de reparos e manutenções.

De acordo com a NBR 5462 a manutenibilidade é a facilidade de manter ou colocar um item em condições de uso conforme especificações de projeto, executando a manutenção sob condições estabelecidas e com uso de procedimentos normalizados.

Paiva (2003) define manutenibilidade como uma ferramenta importante para auxiliar no gerenciamento da confiabilidade, uma vez que sistemas ou equipamentos são reparados após a ocorrência de uma falha. A manutenibilidade pode ser medida através de aspectos corretivos por tempo médio de reparos (Mean time to repair -

MTTR). O tempo de reparo é definido pelos resultados de três atividades conforme definido abaixo:

- Tempo de preparação para reparar uma falha.
- Tempo ativo de na execução da manutenção.
- Tempo de logística como entrega de sobressalentes e mobilização de recursos.

Lafraia (2011) define que do ponto de vista matemático, a manutenibilidade é a probabilidade de o equipamento ser liberado para operação sob as condições exigidas no projeto e dentro de um determinado tempo, com a execução da manutenção dentro dos procedimentos prescritos. A ação de manutenção pode ser de forma preditiva, preventiva ou corretiva.

A Tabela 2 mostra o custo em cada situação de manutenção, onde a preditiva possui custo bem inferior às demais.

Tabela 2 - Custo por tipo de manutenção

Tipo de Manutenção	Custo US\$/HP/ano
Corretiva Não Planejada	17 a 18
Preventiva	11 a 13
Preditiva e Monitoramento de Condição/Corretiva Planejada	7 a 9

Fonte: Pinto e Xavier (2001)

A disponibilidade é definida por Lafraia (2011) como a probabilidade de um sistema estar disponível, em condição de operação no instante t . A NBR 5462 define disponibilidade como 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, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

3.2 RCM (RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE)

De acordo com Siqueira (2005) o conceito fundamental e objetivo da manutenção centrada na confiabilidade, MCC ou RCM, é realizar a manutenção mais propícia a evitar cada modo de falha. Já Lafraia (2011) cita como principal objetivo da MCC de garantir que um equipamento continue a exercer suas funções desejadas. Ambos os autores indicam como caminho para identificar modos de falhas e garantir o funcionamento do equipamento uma metodologia chamada Análise de Modos de Falhas e Efeitos (FMEA) que possibilita a padronização da análise para identificarmos de que forma ocorre a falha, o que causa cada falha, o que acontece quando ocorre a falha e o que deve ser feito para preveni-la. Além disso, no enfoque tradicional da manutenção todas as falhas são ruins e, portanto, todas devem ser prevenidas. Esta filosofia não condiz com a realidade devido ser impossível tecnicamente evitar-se todas as falhas e ainda que fosse possível os recursos financeiros não seriam suficientes.

Na MCC queremos alcançar o melhor que o equipamento possa oferecer para o sistema dentro do que ele foi concebido, assegurando-se que continue a cumprir suas funções no sistema. O foco é determinar o que deve ser feito para preservar a função do sistema ao invés de tão somente manter o equipamento.

A Tabela 3 faz uma comparação entre a manutenção tradicional e a manutenção sobre a ótica da MCC.

Tabela 3 - Comparação da Manutenção Tradicional com a MCC

CARACTERÍSTICA	MANUTENÇÃO TRADICIONAL	MCC
Foco	Equipamento	Função
Objetivo	Manter o equipamento	Preservar a função
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e Sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Deterioração do equipamento	Consequências das falhas
Normalização	Não	Sim
Priorização	Inexistente	Por função

Fonte: Siqueira (2005)

Moubray (1996) defende que a estrutura para a implantação do RCM deve ser fundamentada em função de sete questões básicas:

- Quais são as funções e os padrões de desempenho do item no seu contexto operacional atual?
- De que forma ele falha em cumprir suas funções?
- O que causa cada falha operacional?
- O que acontece quando ocorre cada falha?
- De que forma cada falha tem importância?
- O que pode ser feito para prevenir cada falha?
- O que deve ser feito, se não for encontrada uma tarefa preventiva apropriada?

3.3 PLANOS DE MANUTENÇÃO

Segundo Xenos (1998) um plano de manutenção é constituído de um conjunto de ações preventivas e de datas para a sua execução. Pode ser definido também por um calendário de ações preventivas. Um bom plano de manutenção apresenta a coleção de todas as ações preventivas que devem ser tomadas para evitar as falhas e garantir o bom funcionamento dos equipamentos. Quanto melhor for o conhecimento das necessidades de manutenção preventiva, melhor será o conteúdo do plano. A elaboração dos planos de manutenção se torna simples quando as ações preventivas de reforma ou troca que os equipamentos exigem e seus respectivos intervalos já são pré-estabelecidos. A princípio estas ações devem estar

registradas no padrão de manutenção do equipamento em questão, e devem conter instruções detalhadas sobre o que inspecionar, reformar ou trocar, com que frequência e o por que e como estas tarefas devem ser executadas.

O cumprimento do plano de manutenção é indispensável na redução de falhas em equipamentos, sendo assim um instrumento muito utilizado por equipes de manutenção nas grandes indústrias.

A seguir será desenvolvido todo o embasamento teórico sobre o FMEA - Failure Mode and Effects Analysis, ferramenta utilizada em conjunto com a metodologia RCM abordada no presente estudo.

3.4 FMEA - ANÁLISE DE MODOS DE FALHA E EFEITOS

A técnica do FMEA – Failure Mode and Effects Analysis nasceu na indústria aeronáutica na década de 1960 com objetivo de analisar a segurança de aeronaves. Desde então, esta técnica vem sendo utilizada em vários seguimentos da indústria (VILLEMEUR, 1992).

Segundo Palady (1997) o FMEA é uma das técnicas de baixo risco mais eficientes para a prevenção de problemas e identificação das soluções mais eficazes em termos de custos, a fim de prevenir esses problemas. Como procedimento, o FMEA oferece uma abordagem estruturada para avaliação, condução e atualização do desenvolvimento de projetos e processos em todas as disciplinas da organização.

Palady (1997) ainda aborda que esta técnica oferece três funções diferentes: é uma ferramenta para prognóstico de problemas; é um procedimento para desenvolvimento e execução de projetos, processos ou serviços, novos ou revisados; é o diário do projeto, processo ou serviço.

Segundo Helman & Andrey (1995) a partir da detecção de pontos problemáticos, relacionando as falhas nos elementos do subsistema com suas consequências no sistema como um todo, o FMEA vem com o objetivo de realizar melhorias nos sistemas, e é aplicável nas seguintes situações:

- Melhoria de um produto já existente ou processo já em operação, a partir da identificação das causas das falhas ocorridas e seu posterior bloqueio;

- Detecção e bloqueio de causas de falhas potenciais (antes que aconteçam) em produtos ou processos já em operação ou ainda na fase de projeto.

Segundo Palady (1997), a FMEA pode ser caracterizada em dois tipos

- FMEA de projeto - (DFMEA – Design Failure Modes and Effects Analysis);
- FMEA de processo - (PFMEA – Process Failure Modes and Effects Analysis).

A grande diferença entre estes dois tipos de FMEA está nos objetivos. Cada um deles tem objetivos bem diferentes, que podem ser identificados através das seguintes perguntas:

- Como esse projeto/processo, pode deixar de fazer e o que deve fazer?
- O que devemos fazer para prevenir essas falhas potenciais de projeto/processo?

Percebe-se que na FMEA o sequenciamento da análise é de forma down-top, pois objetiva determinar os modos de falha dos componentes mais simples, as suas causas e de que forma elas afetam os níveis superiores do sistema.

Segundo Palady (1997) a lista a seguir resume alguns benefícios do desenvolvimento e manutenção de FMEA's eficazes:

- Economiza nos custos e tempo de desenvolvimento;
- Serve como guia para o planejamento de testes mais eficazes;
- Ajuda a desenvolver sistemas eficazes de manutenção preventiva;
- Fornece ideias para testes incorporados ao projeto;
- Reduz eventos não previstos durante o planejamento de um processo;
- Fornece uma referência rápida para resolução de problemas;
- Reduz mudanças de engenharia;
- Aumenta a satisfação do cliente;
- Serve como chave para acompanhar o projeto e atualizá-lo em toda a organização;
- Reduz controles de custo desnecessários no processo;
- Identifica as preocupações de segurança a serem abordadas;
- Fornece ideias para o Projeto Robusto, contra os hábitos do cliente;
- Salvaguarda a repetição dos mesmos erros no futuro

- Captura e mantém o conhecimento do produto e do processo na organização
- Na visão contrária aos benefícios, Palady (1997) ressalta também obstáculos e aplicações ineficazes mais comuns do FMEA que são:
 - O FMEA não é projetado para substituir o trabalho do engenheiro;
 - Nem todos os modos de falha concebíveis devem ser avaliada no FMEA;
 - O FMEA não é ferramenta para seleção do conceito de projeto ideal;
 - O FMEA, como todas as ferramentas, possuiu limitações.
 - As escalas de severidade, ocorrência e detecção devem ser ajustadas a fim de refletir os produtos e processos da organização;
 - Se você não tem certeza do valor que deve atribuir a uma dessas escalas não atribua o valor mais;
 - O RPN, Grau de Prioridade de Risco, pode causar confusão;
 - A aplicação do princípio de Pareto ao RPN não é uma aplicação eficaz do princípio de Pareto;
 - Um RPN muito reduzido pode justificar ações corretivas;
 - A maioria dos FMEAs não deveria ser desenvolvido em uma reunião;

3.4.1 Confiabilidade

Segundo Lafraia (2011) confiabilidade é a probabilidade com que um componente, equipamento ou sistema exercerá sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas.

A ABNT através da NBR 5462 define confiabilidade como a probabilidade de que um item possa desempenhar sua função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso.

Pinto e Xavier (2001) com base na NBR 5462 caracterizam melhor os quatro conceitos importantes que estão inseridos na definição de confiabilidade, são eles:

- a) Probabilidade: é a razão entre o número de casos favoráveis sobre o número de casos possíveis, associado a um intervalo de tempo t .
- b) Função requerida: é o mesmo que realizar o serviço esperado, ou atender o desempenho esperado. Existe um patamar de admissibilidade abaixo do qual a função não é mais satisfatória.

- c) Condições definidas de uso: são as condições gerais na qual o equipamento está em operação, sendo o ambiente instalado, grau de agressividade, solicitações físicas, mecânicas e químicas. Equipamentos iguais sob condições de uso diferentes apresentam confiabilidade diferente.
- d) Intervalo de tempo: é o período de tempo definido e medido. A confiabilidade de um equipamento para um intervalo de tempo t_1 será diferente para um equipamento com intervalo de tempo medido t_2 devido à probabilidade variar com o tempo.

Lafraia (2011) expõe que ainda hoje a confiabilidade é encarada por muitos como um tópico separado da qualidade, porém, o termo “qualidade do produto” engloba todos os desempenhos e características do meio incluindo a confiabilidade.

3.4.2 Ferramentas Matemáticas

Lafraia (2011) conceitua as funções abaixo como:

- a) Funções de Confiabilidade e Risco:

A função densidade de falhas ($f(t)$), representa a variação de probabilidade de falhas por unidade de tempo. É representada graficamente por uma função, distribuição de probabilidade. Matematicamente é expressa pela equação (1):

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

Nesta fórmula, $F(t)$ é a função acumulada de falhas. Mostra a probabilidade de falha entre um período de tempo t_1 e t_2 . É representada graficamente por uma função de distribuição de densidade acumulada. Matematicamente é expressa pela equação (2):

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cdot dt \quad (2)$$

Em confiabilidade, a preocupação é com a probabilidade de que um item sobreviva a um dado intervalo estabelecido (de tempo, ciclos, distância). Isto é, não haverá

falhas no intervalo de 0 a X. A confiabilidade é dada pela função confiabilidade $C(t)$, conforme equação (3):

$$C(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t)dt = 1 - F(t) \quad (3)$$

Logo, a equação (4), $F(t)$ é a probabilidade de falha do sistema, ou seja:

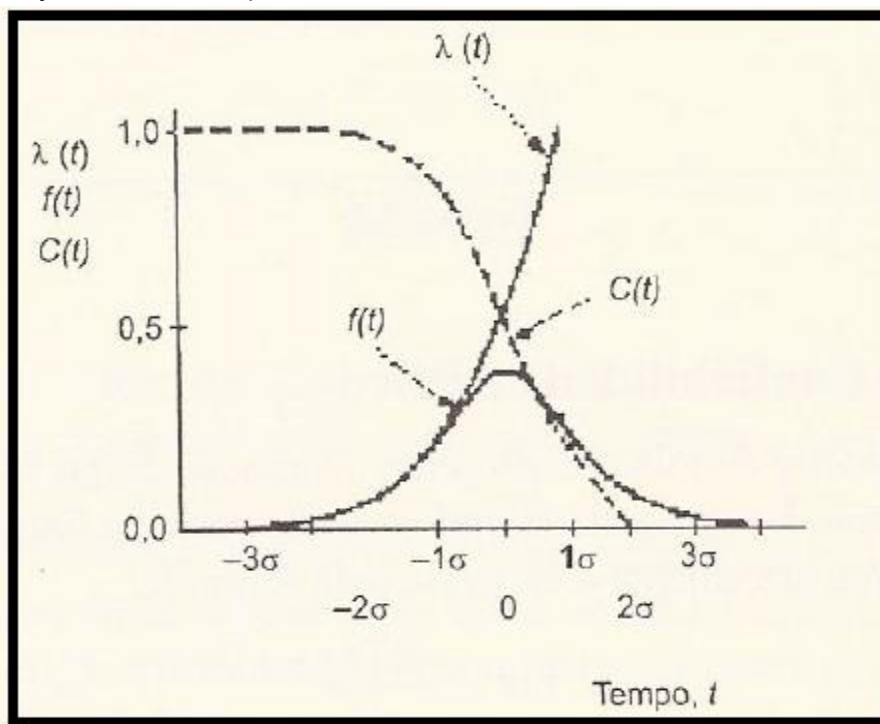
$$F(t) = 1 - C(t) \quad (4)$$

A taxa condicional de falha é a probabilidade condicional de falha no intervalo de t a $t + dt$, dado que não houve falha em t . Esta função também é conhecida como função de risco ($\lambda(t)$). Matematicamente é representada pela equação (5):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (5)$$

A relação gráfica entre os diversos parâmetros pode ser observada na Figura 16:

Figura 16 - Relação Gráfica entre parâmetros de confiabilidade



a) Outras Definições Ligadas à Confiabilidade:

Tempo médio para falha (TMPF) – é o tempo médio para falha de componentes que não podem ser reparados. É aplicável a componente cuja vida termina na primeira falha. É similar ao Tempo Médio Entre Falhas (TMEF), que é aplicável a componentes reparáveis. É representado matematicamente pela fórmula (6):

$$TMPF = \frac{\sum_{i=1}^n TPF_i}{N} \quad (6)$$

b) Tempo médio para reparo (TMPR) – é o tempo para o reparo de componentes; obtido de uma amostra nas mesmas condições de uso do componente desejado. É representado matematicamente pela fórmula (7):

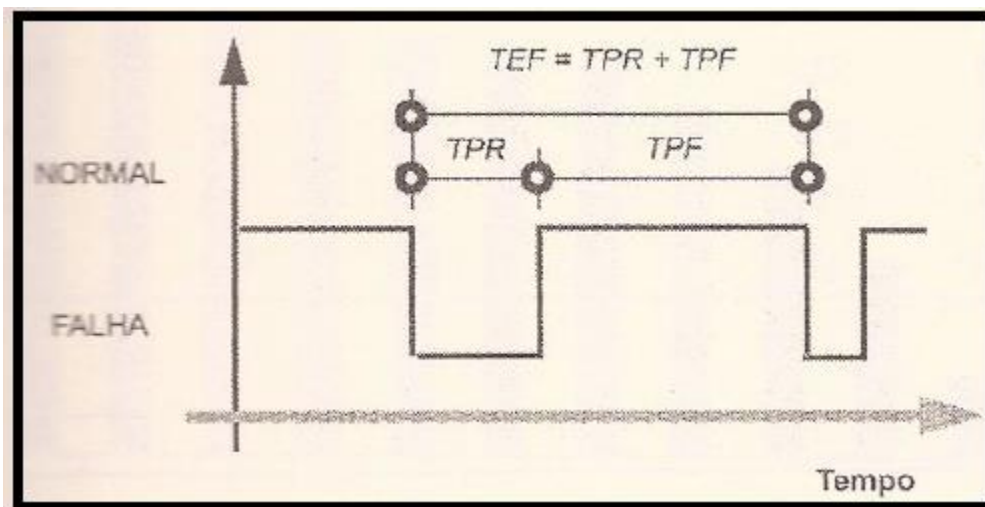
$$TMPR = \frac{\sum_{i=1}^n TPR_i}{N} \quad (7)$$

c) Disponibilidade (D) – é a probabilidade de que um componente que sofreu manutenção exerça sua função satisfatoriamente para um dado tempo t. Na prática, é expresso pelo percentual de tempo em que o sistema encontra-se operante, para componentes que operam continuamente. Já para componentes reserva, é a probabilidade de sucesso na operação do sistema quando demandado. Frequentemente usado quando altos custos estão envolvidos com a perda da função. Ideal para descrever equipamentos em plantas de processo. É representado matematicamente pela fórmula (8):

$$D = \frac{TMPF}{TMPF - TMPR} \quad (8)$$

d) A Figura 17 representa graficamente a relação entre disponibilidade e a situação do componente:

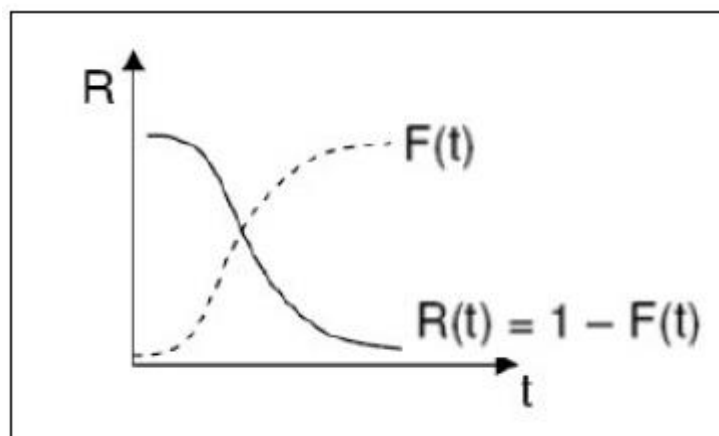
Figura 17 - Relação entre Disponibilidade e a Situação do Componente.



Fonte: Lafraia (2011)

Considerando que $C(t) = R(t)$. Tem-se abaixo, na Figura 18, o gráfico da curva básica da confiabilidade $R(t)$ em relação ao seu complementar, a curva de probabilidade de falha $F(t)$:

Figura 18 - Curva confiabilidade versus não confiabilidade



Fonte: Barbosa (2008)

Lafraia (2011) descreve que tradicionalmente, as fases da vida de um componente ou sistema são descritos pela curva da banheira. Porém, antes de discuti-la é necessário definir o que vem a ser taxa de falhas na qual é a frequência de acontecimento das falhas num determinado intervalo de tempo e mensurado pelo número de falhas por hora de operação.

A taxa de falhas é normalmente representada por λ . O inverso da taxa de falhas é conhecido como o Tempo Médio Entre Falhas (TMEF) ou MTBF (Mean Time Between Failures). A fórmula (9) do TMEF é:

$$TMEF = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

A taxa média de falhas em um dado intervalo de tempo (t_1 , t_2) depende da taxa de falha conforme equação (10):

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) \cdot dt \quad (10)$$

3.4.3 Curva da Banheira

A curva da banheira apresenta, de maneira geral, as fases da vida de um componente. Embora ela seja apresentada como genérica, a curva da banheira só é válida para componentes individuais (LAFRAIA, 2011).

Segundo Pinto e Xavier (2001), essa curva foi considerada, por muito tempo, como um padrão para o comportamento de equipamentos e sistemas, mas a partir do estudo de confiabilidade elaborado pela United Airlines – Figura 19 – e da possibilidade de uma boa atuação nas fases que antecedem a entrada em operação dos equipamentos não deve ser considerada como tal.

De acordo com Crowe e Feinberg (2001) a curva representa a taxa de falha de um equipamento em função do tempo, é também conhecida como curva da banheira devido ao seu formato, evidenciado na Figura 20.

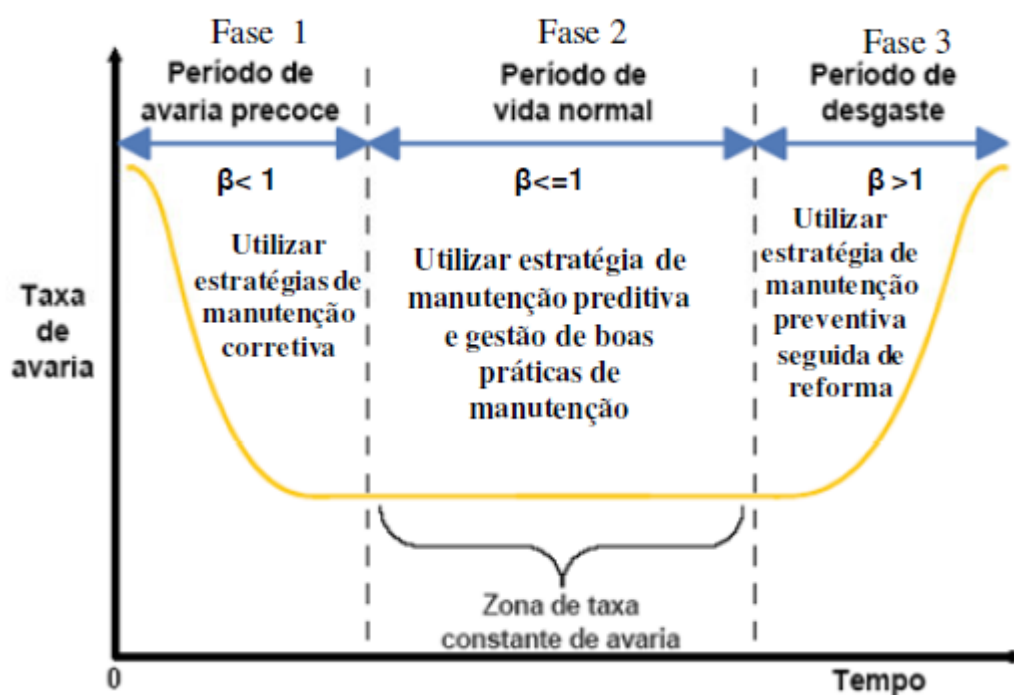
A curva da banheira representa o comportamento, ao longo da vida, de vários dispositivos elétricos, mecânicos e de softwares, sendo determinada a partir de estudos estatísticos. Três regiões distintas da curva podem ser identificadas na figura 8: região de falhas prematuras, região de vida útil e região de desgaste.

Figura 19 - Tipos de curvas de falha

Padrão de Falha	Idade / Probabilidade de Falha	UAL 1968	Bromberg 1973	US Navy 1982
A		4	3	3
B		2	1	17
C		5	4	3
D		7	11	6
E		14	15	42
F		68	66	29

Fonte: Pinto e Xavier (2001)

Figura 20 - Curva da banheira



Fonte: Crowe e Feinberg (2001)

Fase 1 (período de avaria precoce):

Conforme Pinto e Xavier (2001), nesta fase há grande incidência de falhas causadas por componentes com defeitos de fabricação ou deficiências de projeto. Essas falhas também podem ser oriundas de problemas de instalação.

Fase 2 (período de vida normal):

De acordo com Lafraia (2011), o período de vida útil é caracterizado por taxa de falhas constante. Normalmente as falhas são de natureza aleatória, pouco podendo ser feito para evitá-las, nesta fase β é praticamente constante e igual a λ . A região de vida útil apresenta as menores taxas de falha.

Fase 3 (período de desgaste):

Nesta fase β cresce com o tempo e as falhas estão geralmente associadas ao envelhecimento. Há um aumento na taxa de falhas decorrentes do desgaste natural, que será tanto maior quanto mais passar o tempo. (Pinto e Xavier, 2001)

Segundo Pinto e Xavier (2001), normalmente a manutenção arca com todo o ônus do trabalho mal feito nas etapas anteriores, mas, independentemente disso, as consequências se traduzirão em baixa confiabilidade e lucros cessantes para a planta.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA RCM AO PROCESSO

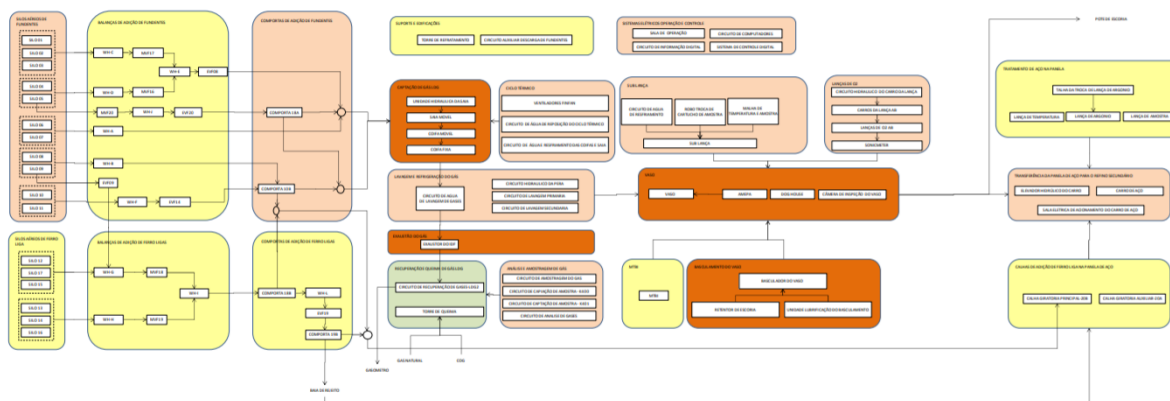
A aplicação da metodologia RCM foi realizada durante a readequação de um sistema de cadastro de equipamentos, estando atrelado ao procedimento descrito a seguir:

1. Criação do Diagrama de Blocos Funcionais (DBF)
2. Revisão de Cadastro
3. Análise da criticidade dos equipamentos
 - a. FMEA
4. Revisão de Equipamentos não críticos
5. Criação e implementação dos Planos de Manutenção

4.1 CRIAÇÃO DO DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAIS (DBF)

O primeiro passo realizado em conjunto com a equipe de manutenção das áreas, foi elaborar o Diagrama de Blocos Funcionais (DBF) registrando todos os equipamentos, independente do número de níveis hierárquicos existentes no sistema de ativos vigente.

Figura 21 - Diagrama de blocos funcionais



Fonte: ArcelorMittal (2018)

Esse trabalho foi fruto de conhecimento técnico das equipes de área, consulta a desenhos técnicos, manuais e visitas em campo. Essa etapa visa limitar fronteiras, incluir todos os equipamentos e elevar o conhecimento do equipamento para a equipe de análise. A visão geral do DBF é representada na Figura 21.

4.2 REVISÃO DO CADASTRO

Com todos os equipamentos no DBF, o segundo passo consistiu em detalhar esses equipamentos até o último nível existente. Nessa fase, foi criada uma planilha com base nas informações já existentes no sistema centralizada e posteriormente validada com as equipes das áreas. Foi possível identificar presença de alguns componentes cadastrados em duplicidade, alguns sem cadastros e alguns itens existentes em campo, sem cadastro no sistema. Todos os ajustes foram realizados através de visitas em campo, avaliação de desenhos técnicos e manuais. Nessa fase pôde-se identificar a necessidade de agrupar, desdobrar ou até mesmo eliminar os equipamentos. Essas alterações foram refletidas no DBF.

Como exemplificado na Figura 22, cada equipamento foi listado suas partes foram segmentadas. Posteriormente foram classificados de acordo com suas especialidades, sendo M para mecânica, E para elétrica e I para instrumentação. Além disso, os equipamentos também foram classificados de acordo com a área de atuação:

- EP: Equipamentos das áreas de produção ou apoio que atendem diretamente a linha de produção
- EA: Equipamentos auxiliares da área de apoio

Figura 22 - Revisão do cadastro e classificação dos equipamentos

		M	E	I	CATEGORIA
MCC03 - TRANSPORTADOR DE CORREIA PRINCIPAL-72"	31.01.122	x	x	x	
MCC03 - ACIONAMENTO ELETROMECHANICO	31.01.122.002				
MCC03 - REDUTOR N°01 - MODELO M3P5F70	31.01.122.002.001				
MCC03 - REDUTOR N°02 - MODELO M3P5F70	31.01.122.002.002				
MCC03 - REDUTOR N°03 - MODELO M3P5F70	31.01.122.002.003				
MCC03 - REDUTOR N°04 - MODELO M3P5F70	31.01.122.002.004				
MCC03 - ACOPLAMENTO HIDRÁULICO N°01	31.01.122.002.005				
MCC03 - ACOPLAMENTO HIDRÁULICO N°02	31.01.122.002.006				
MCC03 - ACOPLAMENTO HIDRÁULICO N°03	31.01.122.002.007				
MCC03 - ACOPLAMENTO HIDRÁULICO N°04	31.01.122.002.008				
MCC03 - FREIO A DISCO N°01 CORREIA MCC03 (M0806-1B)	31.01.122.002.009				
MCC03 - PAINEL CONVERSOR ESTÁTICO CA/CC - ACIONAMENTO FREIO N° 1	31.01.122.015.001				
MCC03 - FREIO A DISCO N°02 CORREIA MCC03 (M0806-2B)	31.01.122.002.010				
MCC03 - PAINEL CONVERSOR ESTÁTICO CA/CC - ACIONAMENTO FREIO N° 2	31.01.122.015.002				
MCC03 - FREIO A DISCO N°03 CORREIA MCC03 (M0806-3B)	31.01.122.002.011				
MCC03 - PAINEL CONVERSOR ESTÁTICO CA/CC - ACIONAMENTO FREIO N° 3	31.01.122.015.003				
MCC03 - FREIO A DISCO N°04 CORREIA MCC03 (M0806-4B)	31.01.122.002.012				
MCC03 - PAINEL CONVERSOR ESTÁTICO CA/CC - ACIONAMENTO FREIO N° 4	31.01.122.015.004				
MCC03 - ACOPLAMENTO VULKAN BND-550 N°01	31.01.122.002.013				

Fonte: ArcelorMittal, 2018

4.3 ANÁLISE DA CRITICIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Buscou-se o envolvimento com todas as equipes de área a fim de ampliar a análise dos equipamentos. Após as devidas análises na Cartilha de Manutenção e Gestão de Ativos, foi possível realizar o levantamento das diretrizes de manutenção e gestão de ativos, que podem ser divididas em: Matriz de Criticidade, Fator de

Correção e Classificação Final da Criticidade. Em seguida, uma análise minuciosa sobre os pontos críticos apresentados baseados na criticidade dos equipamentos. A aplicação da ferramenta FMEA inicia-se nessa etapa. Podemos determinar a criticidade de forma padronizada seguindo os critérios, pesos e notas que cada fator de falha possui, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Critério de criticidade para equipamentos

Item	Fator de Falha	Peso	Critério	Nota
1	Influência na produção	10	Não para a produção da área operacional.	0
			Para a produção da área operacional, afetando em no máximo 1/3 da produção da unidade operacional.	3
			Para a produção da área operacional, afetando mais de 1/3 do plano de produção da unidade operacional.	5
2	Influência na qualidade do produto	10	Não influi na qualidade do produto da área operacional.	0
			Influi na qualidade do produto da área operacional.	3
			Influi na qualidade do produto da unidade operacional.	5
3	Influência no meio ambiente	10	Não influi no meio ambiente.	0
			A falha provoca impacto médio no meio ambiente, sujeito a penalidades legais.	3
			A falha provoca impacto grave no meio ambiente com penalidade legal e/ou perda de imagem	5
4	Influência na segurança pessoal	10	Não influi na segurança pessoal.	0
			Existe risco de acidente pessoal em caso de falha	3
			Existe alto potencial de acidente pessoal, em caso de falha.	5
5	Existência de stand by	8	Possui stand ou não necessita (não afeta a produção).	0
			Afeta a produção da área operacional e não possui stand by.	3
			Afeta a produção da unidade operacional e não possui stand by.	5
6	Ocorrência de falhas	10	Alta confiabilidade, normalmente não há ocorrência de falhas esporádicas e/ou aleatórias. $R(30 \text{ dias}) \geq 95\%$	0
			Média confiabilidade há ocorrência de falhas esporádicas e/ou aleatórias. $75\% \leq R(30 \text{ dias}) < 95\%$	3
			Baixa confiabilidade, ocorrência frequente de falhas. $R(30 \text{ dias}) < 75\%$	5
7	Recuperação da produção após reparo	8	Imediata	0
			Recuperação rápida das condições normais de produção após reparo (< 8 horas)	3
			Recuperação rápida das condições normais de produção após reparo (> 8 horas)	5
8	Influência no custo da produção	8	Não afeta o custo de produção da unidade operacional	0
			afeta o custo de produção da unidade operacional	5

Fonte: ArcelorMittal, 2018

Após a análise da matriz de criticidade, é possível obter o fator de correção dado em função da utilização do equipamento na planta industrial visando atender ao plano de produção no cenário mais atual. A Tabela 5 apresenta os índices de trabalho, dado em relação à porcentagem de trabalho do equipamento em uma faixa de 24 horas trabalhadas, juntamente com o fator de correção correspondente, para que seja possível calcular a criticidade dos equipamentos através da Equação 11.

Tabela 5 - Fator de Correção para Faixa de Criticidade

ÍNDICE DE TRABALHO PLANEJADO (%)	FATOR DE CORREÇÃO
80 a 100	1,0
60 a 79	0,8
40 a 59	0,6
20 a 39	0,4
0 a 19	0,2

Fonte: ArcelorMittal, 2018

$$\text{Faixa de criticidade} = [\sum (\text{Peso} \times \text{Nota}) \times \text{Fator correção}] \quad (11)$$

Com a Faixa de Criticidade obtida, após comparação dos resultados, é realizada a classificação de criticidade em três níveis distintos de acordo com a Tabela 6. Equipamentos que possuem uma faixa de criticidade inferior a 132 são classificados com índice de criticidade C, de baixa criticidade. Os classificados como B, de média criticidade, possuem uma faixa de criticidade entre 132 e 196. Equipamentos tidos como criticidade A são aqueles que possuem prioridade elevada, mas não comprometem o funcionamento da usina. Para todo equipamento classificado como A é realizado uma última avaliação verificando se a produção final é afetada em caso de parada do equipamento durante 8 horas. Caso aconteça, a criticidade deste equipamento passa a ser AA, do tipo “para a usina”, possuindo uma prioridade ainda maior que os classificados como A e espera-se que menos de 5% de todos os equipamentos da área possuam este tipo de classificação.

Tabela 6 - Classificação Final de Criticidade

Faixa de criticidade	Índice de criticidade	Tipo	Percentual esperado*
≥ 196	AA	Para a usina	< 5%
	A	Alta	– 20%
≥ 132 < 196	B	Média	– 50%
< 132	C	Baixa	– 25%

Fonte: ArcelorMittal, 2018

Após o cálculo com os parâmetros citados, todos equipamentos receberam uma classificação para posterior análise, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Classificação dos equipamentos

			Influência na produção (0, 3 ou 5)	Influência na qualidade do produto (0, 3 ou 5)	Influência no meio ambiente (0, 3 ou 5)	Influência na segurança pessoal (0, 3 ou 5)	Existência de stand by - Opção (0, 3 ou 5)	Ocorrência de falhas (Confiabilidade do Item) (0, 3 ou 5)	Recuperação da produção após reparo (0, 3 ou 5)	Influência no custo da produção (0 ou 5)	Fator de Correção (0, 1, 10, 100)	A produção fim de placa ou bobina é interrompida ? (S ou N)	Pontuação Final	Criticidade
3	31.02.180.005	LIP TAKE	5	0	3	3	0	0	5	5	1,0	N	190	B
4		LANÇA DE IGNIÇÃO	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0	N	0	C
5		TOP CONE	5	3	3	0	5	3	3	0	1,0	N	204	A
6		SISTEMA DE MEDIÇÕES ESPECIAIS	0	3	0	0	0	5	0	0	1,0	N	80	C
7		LUBRIFICAÇÃO CENTRALIZADA - PERFILÔMETRO E LANÇA MÓVEL	0	3	0	0	0	5	0	0	1,0	N	80	C
8		SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO DE PROCESSO	0	3	0	3	0	3	0	0	1,0	N	90	C
9		CARÇA DO FORNO	5	3	3	3	5	0	3	0	1,0	N	204	A
10		ESTRUTURA DO FORNO PRÓPRIO	3	0	0	5	0	0	3	0	1,0	N	104	C
11		REFRATÁRIOS DO FORNO	5	0	3	3	5	0	3	0	1,0	N	174	B
12		ILUMINAÇÃO E TOMADAS DO FORNO PRÓPRIO	0	0	0	5	0	0	0	0	1,0	N	50	C
13	31.04.063	CANHÃO OBTURADOR 1	5	3	3	3	5	0	5	5	0,8	S	208	AA
14	31.04.064	CANHÃO OBTURADOR 2	5	3	3	3	5	0	5	5	0,8	S	208	AA
15	31.04.065	CANHÃO OBTURADOR 3	5	3	3	3	5	0	5	5	0,8	S	208	AA
16	31.04.066	CANHÃO OBTURADOR 4	5	3	3	3	5	0	5	5	0,8	S	208	AA
17	31.04.059	PERFURADOR DE GUSA 1	3	3	3	3	3	3	5	5	0,8	N	203,2	A
18	31.04.060	PERFURADOR DE GUSA 2	3	3	3	3	3	3	5	5	0,8	N	203,2	A
19	31.04.061	PERFURADOR DE GUSA 3	3	3	3	3	3	3	5	5	0,8	N	203,2	A

Fonte: ArcelorMittal, 2018

Após avaliação da criticidade e escolha dos equipamentos mais críticos a serem tratados, uma equipe composta por engenheiros mecânicos, engenheiros eletricitas e demais técnicos da área de manutenção é convocada para reuniões periódicas com a finalidade de elaborar o FMEA para os equipamentos de criticidade AA e A. Nestas reuniões foram realizados momentos do tipo *brainstorming*, para a elaboração e adequação do FMEA juntamente com os planos de manutenção dos equipamentos.

A Tabela 7 tem por finalidade exemplificar o cabeçalho de uma planilha FMEA com os principais tópicos a serem preenchidos.

Tabela 7 – Análise de Modos de Falha e Efeitos para Equipamentos – FMEA

EQUIPAMENTO	FUNÇÃO DO EQUIPAMENTO	FALHA FUNCIONAL	MODOS DE FALHAS	S	O	D	RPN	CAUSAS	TAREFA PROPOSTA PELA MATRIZ DE DECISÃO RCM	PONTOS PROPOSTOS PARA ELABORAÇÃO DE PLANOS	P	TIPO	QUEM	TAREFAS EXISTENTES	P	TIPO	QUEM
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Fonte: Autor, 2019

Campo 1 – Equipamento

Consta neste espaço informações básicas de identificação do equipamento analisado. Por exemplo: Transportador de Correia Finos de Minério 1.

Campo 2 – Função do Equipamento

Descreve a função principal que aquele equipamento deverá executar. Como por exemplo: Transportar finos de minério a uma determinada capacidade.

Campo 3 – Falha Funcional

Siqueira (2012, p. 54), define falha funcional como a incapacidade de um item em desempenhar uma função específica dentro dos limites desejados. Exemplo: não transportar minério a uma determinada capacidade.

Campo 4 – Modo de Falha

De acordo com Pereira (2011), falha é a consequência do modo como age sobre a função de um componente. Ou seja, Modo de falha é a descrição da forma de como o equipamento deixa de cumprir a sua função. Por exemplo: Motor elétrico de acionamento do transportador queimado.

Campo 5 – Severidade da Falha

É o indicador que define a gravidade da falha para o equipamento. A atribuição da severidade da falha pode ser classificada de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Tabela de Severidade

Tabela de Severidade	
Severidade	Índice
Marginal: sem efeito no sistema	1
Baixa: ocasiona apenas pequenos transtornos	2 a 3
Moderada: ocasiona grandes danos, sistema inoperante	4 a 6
Alta: ocasiona grandes danos, sistema inoperante	7 a 8
Muito alta: Envolve riscos à operação e segurança	9 a 10

Fonte: Pereira, 2011

Campo 6 – Probabilidade de Ocorrência da Falha

Pereira (2011) define este campo como sendo uma estimativa da probabilidade de ocorrência da falha. Logo, atribuem-se índices para sua ocorrência como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Tabela de Probabilidade e Ocorrência

Tabela de Probabilidade de Ocorrência	
Probabilidade	Índice
Remota: ocorrência de falha improvável	1
Baixa: pouco provável ou poucas falhas	2 a 3
Moderada: falhas ocasionais	4 a 6
Alta: falhas repetitivas	7 a 8
Muito alta: falha inevitável	9 a 10

Fonte: Pereira, 2011

Campo 7 – Probabilidade de Detecção

Pereira (2011) define probabilidade de detecção como sendo o índice pelo qual podemos avaliar a possibilidade de percepção da falha, como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Tabela de Probabilidade de Detecção

Tabela de Probabilidade de Detecção	
Detecção	Índice
Muito alta: chance inevitável	1 a 2
Alta: boa chance de detecção	3 a 4
Moderada: 50% de chance	5 a 6
Baixa: não é provável que seja detectável	7 a 8
Muito baixa: muito provável de ser detectada	9
Absolutamente indetectável: não será, com certeza	10

Fonte: Pereira (2011)

Campo 8 – Índice de Risco (RPN)

Número de Prioridade de Risco, do inglês *Risk Priority Number* (RPN), define os riscos em um FMEA que podem ser quantificados por meio da multiplicação dos fatores obtidos nos campos 5, 6 e 7. Como mostrado na equação 12.

$$RPN = \text{Índice de Severidade} \times \text{Índice de Ocorrência} \times \text{Índice de Detecção} \quad (12)$$

Campo 9 – Causas

Indica o porquê o modo de falha ocorreu, qual foi a possível causa do defeito, uso indevido, erros de projeto, dentre outros que podem ocasionar a falha do equipamento.

Campo 10 – Tarefa proposta pela matriz de decisão RCM

Neste campo será informado o direcionamento da tarefa a ser executada decidida pela matriz decisão RCM, de acordo com o Anexo I.

Campo 11 - Pontos Propostos para Elaboração de Planos

Este campo será preenchido com os novos planos de inspeção para determinado equipamento. Exemplo: Plano de serviço para medição da resistência de isolamento do motor.

Campo 12 – Periodicidade

Neste campo será incluído o tempo necessário para realizar a inspeção nos equipamentos.

Campo 13 – Tipo de inspeção

Qual a natureza da inspeção que será executada. Exemplo: Inspeção sensitiva de rotina.

Campo 14 – Especialista da Área

Neste campo conterá o técnico ou especialista que realizará a inspeção do plano de manutenção. Exemplo: IM – Inspetor Mecânico; M – Mecânico; IE – Inspetor Eletricista.

Depois dessas etapas realizadas foi concluída a elaboração da planilha FMEA, contendo os ajustes dos planos de manutenção do equipamento em questão, que foram modificados e incrementados no sistema da empresa no qual controla as rotas de inspeção feitas pelos inspetores das áreas produtivas da mesma.

Campo 15 – Tarefas Existentes

O campo descreve se a tarefa já é existente ou não.

Campo 16, 17 e 18 – Periodicidade, Tipo e Quem

Descreve a nova faixa de tempo, tipo de inspeção a ser executada/modificada e quem executará a nova tarefa.

Como citado anteriormente, foi realizado uma análise FMEA para cada equipamento que obteve uma classificação A ou AA na área de classificação de criticidade. Dentre os diversos equipamentos onde a ferramenta foi aplicada, exemplifica-se os resultados obtidos após a realização do processo realizado no Canhão de Lama 1. Deve-se ressaltar que, devido a extensão da planilha de FMEA, a segmentação da mesma em figuras distintas mostrou-se necessária.

Figura 24 - Planilha FMEA PT.1

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE PLANOS DE MANUTENÇÃO									
UNIDADE:	53-AF								
1o NÍVEL	53-AF	RESPONSÁVEIS:							
2o NÍVEL	01-A	DATA DA ELABORAÇÃO:							
3o NÍVEL - EQUIPAMENTO	001-CANHÃO DE LAMA 1	DATA DA REVISÃO:	11/02/2016						
EQUIPAMENTO	FUNÇÃO DO EQUIPAMENTO	FALHA FUNCIONAL	MODOS DE FALHAS	S	O	D	RPN	CAUSAS	
			Conexão da tubulação hidráulica vazando	9	2	2	36		
			Junta rotativa hidráulica vazando	9	2	2	36		
			Junta rotativa hidráulica com passagem interna	9	6	9	486	- rompimento/desgaste do retentor - rompimento/ desgaste do anel-oring - final de vida útil - rolamento avariado - Lubrificação deficiente	
			Cilindro com vazamento	9	4	2	72		
			Cilindro com passagem interna (pressão de bico)	9	2	6	108	- Vedação desgastada - Camisa avariada	

Fonte: ArcelorMittal, 2018

Figura 25 - Planilha FMEA PT.2

DIGITAR O TIPO DA TAREFA PROPOSTA: ISR - INSPEÇÃO SENSITIVA DE ROTINA, ISP - INSPEÇÃO SENSITIVA EM PARADA, IPR - INSPEÇÃO PREDITIVA DE ROTINA, IPP - INSPEÇÃO PREDITIVA EM PARADA, SER - SERVIÇO DE ROTINA, SEP - SERVIÇO EM PARADA, PGOR - PLANO DE GARANTIA OPERACIONAL DE ROTINA, PGOP - PLANO DE GARANTIA OPERACIONAL DE PARADA					
CAUSAS	TAREFA PROPOSTA PELA MATRIZ DECISÃO RCM	PONTOS PROPOSTOS PARA ELABORAÇÃO DE PLANOS	Periodicidade	TIPO	QUEM
- rompimento/desgaste do retentor - rompimento/ desgaste do anel-oring - final de vida útil - rolamento avariado - Lubrificação deficiente	S1	Inspeção sensitiva para verificar passagem interna na junta (criar plano e padrão de como fazer o teste)	2	ISP	IM
		Lubrificação da junta rotativa (Manter plano atual de lubrificação)	7	SER	L
- Vedação desgastada - Camisa avariada	S1	Inspeção sensitiva para verificar passagem interna no cilindro (teste em conjunto com a junta rotativa)	2	ISP	IM

Fonte: ArcelorMittal, 2018

Figura 26 – Planilha FMEA PT.3

TAREFAS EXISTENTES	P	TIPO	QUEM
Sensitiva - Plano 130874 - Loc: 31.04.063.002.006 - 8-JUNTA ROTATIVA GIRO - Conexões - Visual			
Sensitiva - Plano 130874 - Loc: 31.04.063.002.006 - 8-JUNTA ROTATIVA GIRO - Lubrificação - Visual	7	ISR	0360-M
Sensitiva - Plano 130874 - Loc: 31.04.063.002.006 - 8-JUNTA ROTATIVA GIRO - Vazamento - Visual			
0360.M.1702.L.0089.01 - Loc: 31.04.063 - LUBRIFICAR CANHÃO DE LAMA 1 CONFORME PADRÃO PO-MAN-AF03-L-M-0019	7	SER	0360-M

Fonte: ArcelorMittal, 2018

4.4 REVISÃO DOS EQUIPAMENTOS NÃO CRÍTICOS

A revisão dos equipamentos não críticos foi realizada baseada nas informações de manuais de fabricantes e do sólido conhecimento técnico das equipes das áreas. Em função da criticidade e relevância, para alguns equipamentos foi adotado da estratégia run to failure, isto é, operar até a falha, visto que não traria maiores impactos ao processo produtivo.

4.5 CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DOS PLANOS DE MANUTENÇÃO

Essa é uma fase não menos importante dentro do processo de revisão dos planos, quando enfim as tarefas de manutenção serão transformadas em planos de manutenção dentro do sistema, permitindo que as áreas usufruam do resultado obtido nos passos anteriores. Essa fase será conduzida da seguinte maneira:

- Preparar o sistema para a carga da nova árvore de cadastro;
- Elaborar as rotas de inspeção;
- Nivelar os recursos;
- Incluir os planos de manutenção;
- Treinar os inspetores e executantes nas novas rotinas de manutenção;
- Testar e validar;

5 RESULTADOS

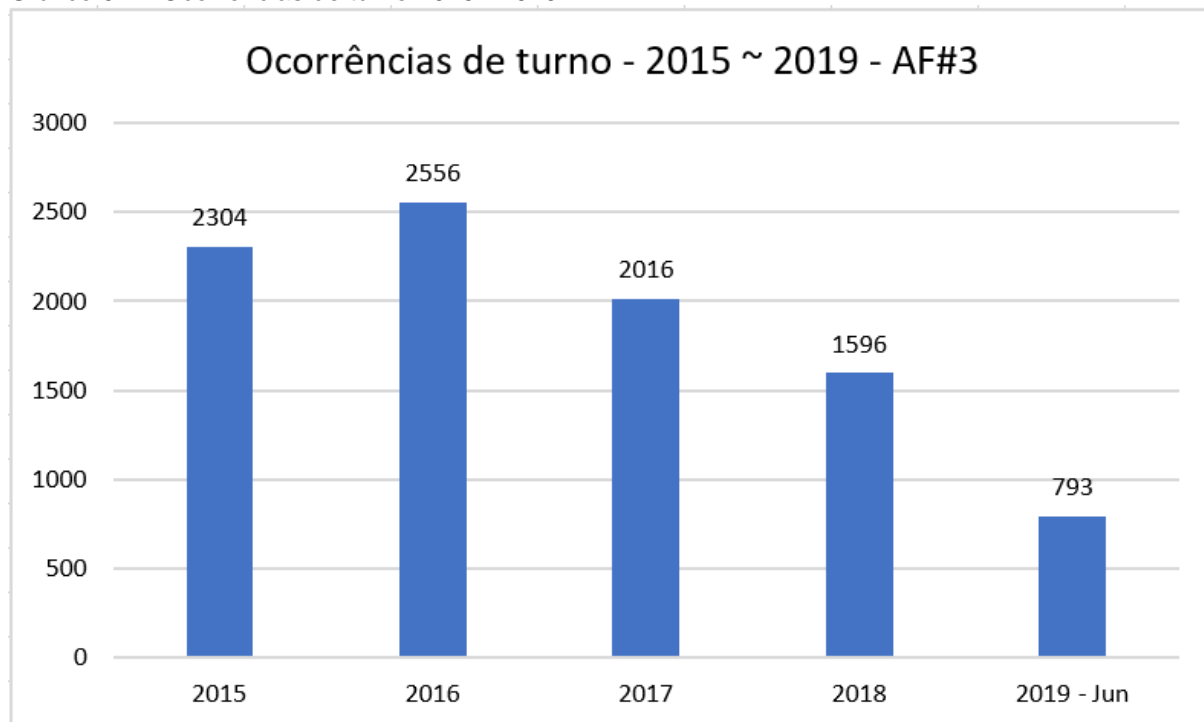
Para a posterior avaliação de resultados do trabalho desenvolvido, registros diários de dados foram realizados entre os anos de 2018 e 2019, além do levantamento dos dados dos anos anteriores tendo como base dois parâmetros principais: Reduções de Volume de Sopros (RVS) e Registro de ocorrências de Turno (REOC). A análise de tais parâmetros mostra-se essencial tendo em vista a relação do mesmo com o desempenho do alto forno.

As reduções de volume de sopros refletem nos resultados de produção da gusa, produto final obtido no processo. Altas reduções de volume inferem em grandes perdas de capacidade produtiva, resultando na consequente redução dos lucros.

O registro de ocorrência de turnos, em geral, visa evidenciar as ocorrências inesperadas, realizadas em “emergência”, em grande maioria devido a falhas inesperadas. Portanto, um grande índice de ocorrências de turno, reduz o tempo de disponibilidade dos equipamentos, tendo em vista a influência da equipe atuando no mesmo a fim de reparar e/ou substituir o equipamento. Assim, a elevação deste índice pode evidenciar uma manutenção ineficiente.

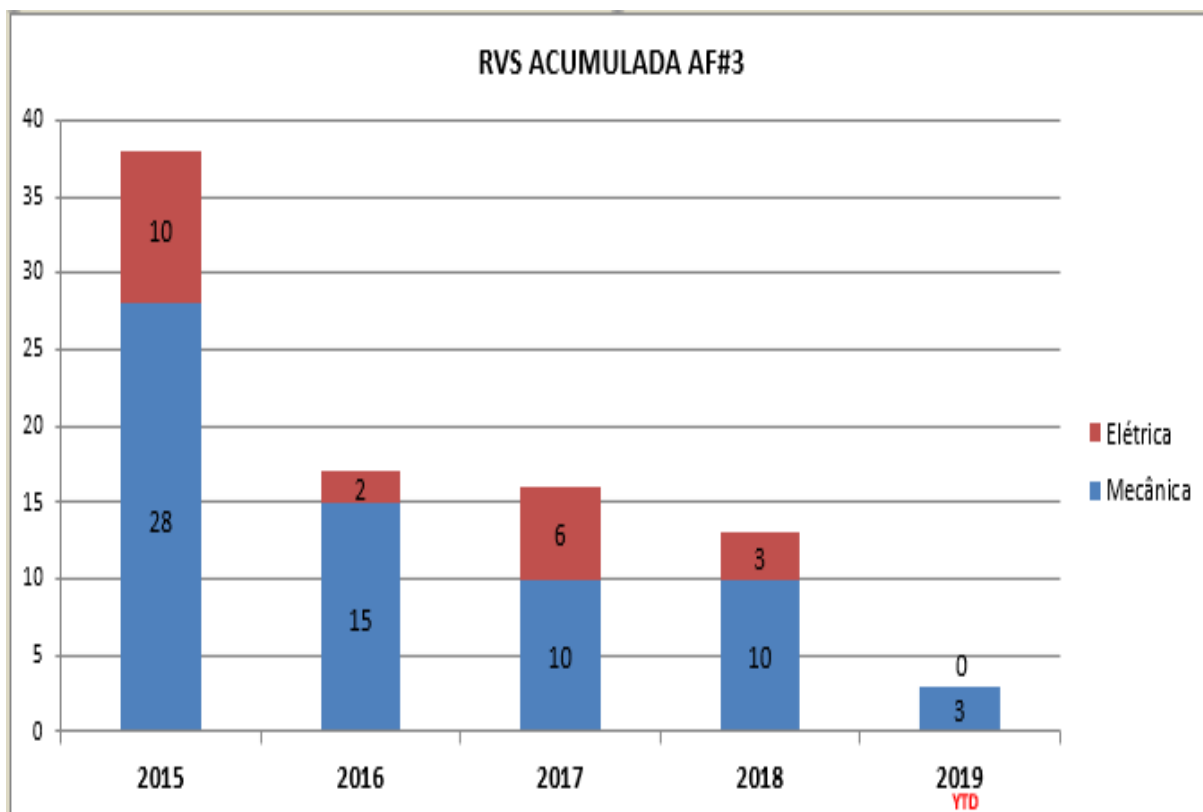
Os gráficos referentes à RVS e REOC são apresentados a seguir.

Gráfico 01 – Ocorrências de turno 2015 ~2019



Fonte: ArcelorMittal, 2019

Gráfico 02 – RVS acumulada



Fonte: ArcelorMittal, 2019

6 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Como mostrado nos gráficos 01 e 02, do ano de 2016 a 2019 ocorreu uma redução acentuada no número de ocorrências de turno, reduzindo de 2556 ocorrências em 2016 para 1598 em 2018. A redução corresponde a 37,6 %.

Em paralelo à redução de ocorrências, tem-se uma grande queda nas reduções do volume de sopro. Tal queda já era esperada, tendo em vista sua ligação direta com a indisponibilidade dos equipamentos que vinha ocorrendo.

Portanto, o benefício do presente estudo é evidenciado, trazendo à tona a importância e utilidade de metodologias como o RCM na indústria atual.

Para que os resultados sigam melhorando, sugere-se a continuação da aplicação das metodologias atreladas à confiabilidade a longo prazo. O acompanhamento em tempo real pode ser implementado em conjunto com os parâmetros de manutenção preditiva já controlados remotamente, desenvolvendo um controle do acompanhamento de criticidade de área online.

7 REFERÊNCIAS

ABM: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. **Aspectos Tecnológicos Relativos à Preparação de Cargas e Operação de Alto-Forno**. Belo Horizonte, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5019**: Produtos e Ligas de Cobre. 1982

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994..

CROWE, D.; FEINBERG, A. *Design for reliability*. Boca Raton: CRC Press, 2001.

GEERDES, M., TOXOPEUS, H., VLIET, C.V.D., **Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction**. 2. ed. Amsterdam: 2009.

HELMAN, H; ANDREY, P. R. P. **Análise de Falhas: aplicação dos métodos FMEA-FTA**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharias da UFMG, 1995.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em: <www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html> Acessado em 05/08/2017.

LAFRAIA, J.R, Ricardo. Manual de confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. São Paulo: Qualitymark, 2011.

MANUAL KSC (KAWASSAKI STEEL) – **Alto Forno e Regeneradores**, Volume 2.1 – Alto Forno ArcelorMittal – 1982.

MONCHY, François. A Função Manutenção. São Paulo: Durban, 1987.

MOUBRAY, J. Manutenção Centrada em Confiabilidade”, 4ª Edição, Woburn, MA, Estados Unidos, 1997.

MOUBRAY, J. Manutenção Centrada em Confiabilidade. São Paulo: Ed. SPES Engenharia de Sistemas Ltda, 2000.

MOURÃO, B. M., YOKOJI, A., MALYNOWSKYJ, A., **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

NUNES, Enon Laércio. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada. 2001.

PAIVA, Márcio José. Gestão de confiabilidade e riscos. Agosto 2003.

PEREIRA, Mario Jorge. **Engenharia de Manutenção – Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.

PINTO, Alan Kardec. "A evolução do processo de Gestão". 2012. Disponível em http://www.tecem.com.br/wpcontent/uploads/2013/03/a-evolucao-do-processo-de-gestao_Tecem.pdf.

PINTO, A.K.; XAVIER, J.N. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PIRES, Jorge de Carvalho. **Formas de atuação na manutenção**. UCL: ww1.ucl.br/disciplinas/ManInd/Lists/Plano%20da%20Disciplina/Attachments/2/UCL_manutenção_unid%201_2.pdf. Acessado em 23 de Agosto de 2012.

SATYENDRA. 2013. Disponível em: <http://ispatguru.com/blast-furnace-top-charging-systems/> Acessado em 07/09/2017.

SATYENDRA. 2014. Disponível em: <http://ispatguru.com/blast-furnace-cast-house-and-its-operation/> Acessado em 07/09/2017.

SATYENDRA. 2016. Disponível em: <http://ispatguru.com/blast-furnace-stock-house/> Acessado em 07/09/2017.

SATYENDRA. 2016. Disponível em: <http://ispatguru.com/cleaning-of-blast-furnace-gas/> Acessado em 07/09/2017.

SIQUEIRA, I.P. **Manutenção centrada na confiabilidade: Manual de implementação**, 2ª reimpressão. Rio de Janeiro: 2012, Qualitymark, 2012, 374p.

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

SODRÉ, Ricardo, "Como estruturar a empresa antes de pensar na Implantação de um Sistema de Gestão de Ativos conforme ABNT ISO 55001". 69º Congresso Anual da ABM. São Paulo, SP. 2014.

SODRÉ, Ricardo. Plano Diretor de Manutenção e Gestão de Ativos. Gerencia de Tecnologia de Manutenção. 2013:2.

VILLEMEUR, A. **Reliability, availability, maintainability and safety assessment: methods and techniques**. Chippenham: John Wiley & Sons, 1992.

PALADY, P. **Análise de Modos de Falhas e Efeitos**. IMAM, 1997.

XENOS. H. G. **Gerenciamento da manutenção produtiva**. Belo Horizonte. Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998

8 ANEXO I

