



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

BRENO MENDES RABELO AVILA

LAÍS RIBEIRO PEDRONI

MCC APLICADA NAS VÁLVULAS DE AR QUENTE DOS REGENERADORES

VITÓRIA

2016

BRENO MENDES RABELO AVLA

LAÍS RIBEIRO PEDRONI

MCC APLICADA NAS VÁLVULAS DE AR QUENTE DOS REGENERADORES

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Me. Oswaldo Paiva Almeida Filho.

VITÓRIA

2016

BRENO MENDES RABELO AVILA

LAÍS RIBEIRO PEDRONI

MCC APLICADA NAS VÁLVULAS DE AR QUENTE DOS REGENERADORES

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 24 de novembro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Professor Me. Oswaldo Paiva Almeida Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Professor Dr. Luciano de Oliveira Castro Lara
Universidade Federal do Espírito Santo

Engenheiro Flavio Tovar Almeida
ArcelorMittal Tubarão

DEDICATÓRIA

Apesar de este trabalho levar nosso nome, só pôde ser bem sucedido com a colaboração de outras pessoas e instituições. Para tanto, agradecemos a todos que fizeram parte dessa jornada, especificamente:

À Deus, por sua proteção, coragem e força para termos chegado nesse momento.

À toda família (avós, tios, primos e todos aqueles que amamos) que nas horas mais difíceis esteve ao nosso lado nos apoiando e criando em nós perseverança para continuarmos.

Ao professor Luciano de Oliveira Castro Lara, pela participação na banca examinadora.

Ao professor Oswaldo Paiva Almeida Filho, pelas expressivas sugestões e orientação segura, precisa e atenciosa.

Aos colegas, amigos, funcionários e demais professores que colaboraram para abrir portas, compartilharam seus conhecimentos e nos trouxeram momentos felizes durante toda a caminhada.

Ao engenheiro Ubirajara Rabêlo Ávila pelas ideias e ativa participação nas discussões, além do imenso carinho.

Ao engenheiro Flavio Tovar Almeida pela inestimável colaboração, generosidade em compartilhar seu conhecimento, disponibilidade e orientações desafiadoras.

Eu, Laís, agradeço especialmente aos meus pais, Adenauer e Rita, às minhas irmãs, Aline e Alice, aos meus cunhados, Raphael e Tiago, e aos meus sobrinhos, Malu e o que está por vir brevemente, pela paciência, carinho, incentivo e apoio incondicional durante toda a minha caminhada para chegar até aqui, pela oportunidade de realizar meus estudos, e por me ensinarem a viver com integridade e respeito a todos. Ao meu amado namorado Gabriel, agradeço pela compreensão e ajuda em todos os momentos, pelo amor dedicado a mim e as alegrias que me proporciona.

Agradeço ao Breno pela parceria e amizade desde o início, e à sua família pelo carinho que sempre me receberam durante toda a nossa jornada.

Eu, Breno, agradeço em especial aos meus pais, Ubirajara e Carla Beatriz, pelo suporte emocional, financeiro e todo o sacrifício que tiveram para poder me colocar neste momento. Sou grato às minhas irmãs (Letícia e Mariane), aos meus sobrinhos (João Vitor, Gabriela e Isabela) e ao meu cunhado (José Alberto) pelo incentivo, carinho e apoio. Ressalto a importância de todos os meus amigos e daqueles que amo neste trabalho, pois me incentivaram e me deram assistência nos momentos mais difíceis. Finalmente, o companheirismo, a dedicação e a amizade da Laís foram imprescindíveis para realização deste trabalho.

RESUMO

Visa-se aplicar o método da Manutenção Centrada em Confiabilidade nas Válvulas de Ar Quente, enfatizando a análise das funções dos equipamentos e consequências das falhas, na sistemática de manutenção. Para tanto, consolida-se as informações necessárias acerca do dispositivo na FMEA - Análise dos Modos de Falhas e Efeitos.

A importância do equipamento para o processo produtivo da siderurgia é inquestionável. A Válvula de Ar Quente é localizada entre o regenerador e o alto-forno, a fim de garantir o fluxo de ar quente ideal para o sistema. Devido ao custo da manutenção corretiva, efeito da falha na segurança operacional no meio ambiente, na qualidade e principalmente na produção, sua criticidade é elevada.

Palavras-chave: Manutenção Centrada em Confiabilidade, Válvula de ar quente dos regeneradores, regenerador do alto-forno, FMEA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gerações da manutenção.	12
Figura 2: Emissão do sinal ultrassônico.	16
Figura 3: Reflexão do sinal ultrassônico.....	16
Figura 4: Análise de vibração mecânica.....	17
Figura 5: Análise ferrográfica.	18
Figura 6: Análise termográfica.....	19
Figura 7: Curva da banheira.....	21
Figura 8: Fluxograma simplificado do processo siderúrgico.....	25
Figura 9: Alto-forno e equipamentos adjacentes.	28
Figura 10: Carcaça do alto-forno demonstrando suas regiões.....	29
Figura 11: Esquema do regenerador.....	31
Figura 12: Sistema de insuflamento de ar quente do alto-forno.	32
Figura 13: Desenho da VAQ com detalhes.	35
Figura 14: Trincas no corpo da VAQ.	42
Figura 15: Detalhe da interferência entre sede e disco.	43
Figura 16: FMEA da Válvula de Ar Quente	52
Figura 17: Desenho Técnico da Válvula de Ar Quente	53
Figura 18: Matriz de Decisão.....	54

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – American Bureau of Shipping

D – Detecção

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos)

FTA – Faut Tree Analysis (Análise de Árvore de Falha)

GAF – Gás de alto-forno

GC – Gestão do Conhecimento

GCO – Gás de coqueria

MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NBR – Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

O – Ocorrência

PVP – Programa de validação/verificação do projeto

RPN – Risk Priority Number

S – Severidade

SAE – Society of Automotive Engineers

TBM – Time Based Maintenance (Manutenção Baseada no Tempo)

TMEF – Tempo Médio Entre Falhas

TMPF – Tempo Médio para Falha

TMR – Tempo Médio para Reparo

TPM – Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)

VAQ – Válvula de Ar Quente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVO.....	10
2.1. OBJETIVO GERAL.....	10
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1. MANUTENÇÃO	11
3.1.1. EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO	11
3.1.2. EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO	12
3.1.3. TIPOS DE MANUTENÇÃO	13
3.1.3.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA OU REATIVA	13
3.1.3.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	14
3.1.3.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	15
3.1.3.4. MANUTENÇÃO DETECTIVA	19
3.2. CONFIABILIDADE.....	20
3.2.1. PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE	20
3.2.1.1. CURVA DA BANHEIRA	20
3.2.1.2. INDICADORES DE MANUTENÇÃO.....	21
3.2.1.2.1. DISPONIBILIDADE.....	23
3.2.1.3. MANUTENABILIDADE.....	23
3.3. O PROCESSO SIDERÚRGICO	24
3.3.1. O ALTO-FORNO	27
3.3.2. OS REGENERADORES	30
3.4. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE	33
3.4.1. CONCEITO E OBJETIVOS.....	33
3.4.2. HISTÓRICO E NORMATIZAÇÃO	33

4. MATERIAL E MÉTODO	34
4.1. VÁLVULAS DE AR QUENTE	34
4.2. PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE	36
4.2.1.1. IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA	37
4.2.1.2. ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS	38
5. RESULTADOS	41
6. CONCLUSÃO	45
7. REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE A – Tabelas de classificação da O (Ocorrência), D (Detectabilidade), S (Severidade), ϕ (Velocidade de degradação).	49
APÊNDICE B – FMEA da Válvula de Ar Quente	52
ANEXO A – Desenho Técnico da Válvula de Ar Quente	53
ANEXO B – Matriz ou Diagrama De Decisão	54

1. INTRODUÇÃO

A competitividade entre as empresas atuais leva a uma busca frenética na melhor gestão dos ativos. A competência e eficiência, entre outros aspectos, na gestão da manutenção são sempre consideradas como fator fundamental.

Neste contexto, a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) apresenta-se como uma alternativa forte, considerando a sua metodologia muito consolidada, como ferramenta indispensável no auxílio às políticas de gestão das empresas.

Esta metodologia afeta diretamente a competitividade, extrapolando de uma simples tática de manutenção para fazer parte da estratégia empresarial.

Além dos aspectos gerais inerentes às metodologias de gestão de ativos, existe algo específico nos dias de hoje a considerar, que reforçam a utilização da MCC como método adequado a manutenção.

A conscientização e ou a imposição legal estão cada vez mais presentes quando deparamos com as questões ambientais e de segurança na gestão da manutenção.

A automatização dos sistemas aliada à instrumentação de última geração necessita de dados e conceitos intimamente relacionados à confiabilidade, pois estão cada vez menos necessitados da intervenção humana. A metodologia MCC privilegia esta posição ao contrario de outras metodologias que dependem principalmente das decisões mantenedoras como e o caso da Manutenção Produtiva Total (TPM - Total Productive Maintenance).

É importante estarmos convencidos da metodologia certa a ser implantada, mas é igualmente importante sabermos que não é fácil sua implantação e nem sempre ela acontece de maneira consistente. Necessita comprometimento de todos envolvidos e sinergia com os objetivos da empresa. Além dos aspectos técnicos, tem os aspectos gerenciais e organizacionais a se levar em consideração. Por último, mas não menos importante e, deve-se ter o histórico de falhas, conhecimento profundo do sistema, planta ou equipamento e cultura da equipe de manutenção e operação que em muitos casos o conhecimento se dá de forma prática o que ratifica a necessidade da Gestão de Conhecimento - GC.

Independente da política de gestão da manutenção a ser adotado, deve se estar atento ao que empresa sabe, cultua, utiliza e também a velocidade que aprende e convive com o novo em situações de mudanças.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é implementar a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) na válvula de ar quente.

2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Aplicar a metodologia MCC na redução de falhas de um equipamento industrial em condições operacionais reais, avaliando seus resultados através de um estudo de caso, utilizando da ferramenta Analise dos Modos de Falhas e Efeitos (FMEA).

O equipamento em questão é de muita importância para o processo produtivo da Área de Redução do Gusa. A Válvula de Ar Quente atua no sistema de insuflamento de ar dos regeneradores para as ventaneiras do alto-forno. Sua criticidade é das mais altas, em função do custo da manutenção corretiva, efeito da falha na segurança operacional, no meio ambiente, na qualidade e principalmente na produção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MANUTENÇÃO

3.1.1. EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO

No período que antecede a Segunda Guerra Mundial, os equipamentos, em geral, eram superdimensionados e com projetos simples. A disponibilidade dos equipamentos e a preocupação pela prevenção das falhas não eram prioridades. Sua manutenção era de fácil execução sendo a limpeza e a lubrificação suficientes, sem a cultura de intervenções sistemáticas. Essas características pertencem a Primeira Geração da Manutenção.

O pós-guerra foi marcado pela baixa oferta de mão de obra especializada e aumento da necessidade de produtos industrializados. Esse cenário foi propício para a mecanização do processo produtivo, trazendo ao parque industrial das empresas um aumento de maquinário de alta complexidade. Surge o conceito de prevenir falhas a partir da manutenção, porém, concomitantemente o aumento dos custos operacionais. Neste momento, vê-se a necessidade de aliar a este pensamento o planejamento e o controle da manutenção, marcando a Segunda Geração da Manutenção.

Na Terceira Geração da Manutenção iniciou-se a preocupação com a maximização da vida útil e o estudo da disponibilidade e da confiabilidade dos equipamentos. Tudo isso aliado à inserção da responsabilidade com o ambiente, segurança, qualidade e custos. Perceberam que existiam outros fatores, além da idade operacional, que influenciam na probabilidade de alguma falha ocorrer.

De acordo com Queiroz et al (2013), o surgimento do método de análise dos modos de falha e seus efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis* - FMEA) marcou a Quarta Geração da Manutenção. Novas evoluções apareceram, dentre elas: monitoramento da condição de operação dos equipamentos, ferramenta de suporte a decisões e até mudanças de atitudes empresariais. Entendeu-se que o envolvimento de todos os níveis hierárquicos da empresa e a criação de grupos

multidisciplinares seria o modo mais eficiente de gerenciamento de ativos. Esta geração tende a utilizar a gestão do ativo juntamente com a gestão do risco associado à ocorrência do evento, visando detectar e se anteceder aos possíveis prejuízos e prever os benefícios.

Figura 1: Gerações da manutenção.

Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
• Ações reativas • Superdimensionamento de equipamentos • Baixa disponibilidade	• Mecanização da produção • Prevenção de Falhas • Aumento do custo operacional	• Responsabilidade com ambiente, segurança... • Maximização da vida útil • Controle de custos	• Gerenciamento do ativo aliado ao gerenciamento do risco

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.1.2. EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO

Juntamente com o desenvolvimento das máquinas para a produção de bens de consumo e com as novas demandas criadas pela sociedade, surgiu a necessidade da manutenção. Até o ano de 1914 as atividades de manutenção eram executadas pelo mesmo efetivo de operação, sendo colocada em segundo plano. Entretanto, no final do século XIX, com a mecanização das indústrias, valorizou-se a realização de reparos.

Com a Primeira Guerra Mundial, no início do século XX, houve a necessidade das indústrias manterem uma produção mínima para suprir o mercado, sendo fundamental a dedicação exclusiva dos operadores. Tal fato levou à criação de equipes exclusivas para a execução da manutenção, surgindo os primeiros setores de manutenção com enfoque em serviços corretivos. As intervenções para correção ocorriam apenas quando havia uma parada de produção inesperada devido à quebra de equipamentos.

A grande demanda do mercado ao longo da Segunda Guerra Mundial gerou a necessidade do aumento da produção, forçando a indústria a inovar suas técnicas de manutenção para evitar a falha de equipamentos. O surgimento da Manutenção preventiva visa implementar recomendações de substituição de peças em intervalos de tempo previamente programados.

O desenvolvimento tecnológico atrelado ao avanço da engenharia na manutenção desencadeou no nascimento da Manutenção Preditiva. A inserção de modernos softwares e instrumentos de monitoramento de condições operacionais das máquinas possibilitou a intervenção de uma produção no tempo correto, obtendo o máximo desempenho dos componentes e substituindo-os antes da falha.

Segundo Bartholomeu (2007), atualmente um novo conceito de manutenção surge no mercado, a Proativa, que atua desde a fase de projeto, visando benefícios ao especificar a instalação. Tais medidas minimizam as paradas de produção otimizando o processo produtivo, aumentando sua competitividade.

3.1.3. TIPOS DE MANUTENÇÃO

Em função do planejamento de atividades e dos objetivos a serem alcançados com o método aplicado, é possível classificar o tipo de manutenção realizada. Torna-se perceptível a diferença entre os métodos a partir do momento que a atividade de manutenção é colocada em prática.

3.1.3.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA OU REATIVA

Segundo definição da NBR 5462 (1994, p. 7), a manutenção corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida. Portanto, simplificadamente, a manutenção reativa visa corrigir, restaurar, recuperar a capacidade produtiva de um

equipamento ou instalação, que tenha cessado ou diminuído sua capacidade de exercer as funções às quais foi projetado.

Profissionais da área acreditam que não existem vantagens na manutenção corretiva, entretanto, quando se trata de um equipamento de baixa criticidade e que os custos de reparo são inferiores aos custos de inspeções ou manutenções preventivas, a manutenção corretiva é a melhor estratégia a ser adotada.

Dentre as desvantagens da técnica de manutenção reativa estão os altos custos de mão-de-obra, peças e serviços, perda de produção enquanto o equipamento esta inoperante, demanda de alto estoque de sobressalentes e o risco de falhas inesperadas. Apesar de possuir tais inconvenientes, este tipo de manutenção ainda é largamente utilizado atualmente, sendo um dos desafios da indústria impedir sua aplicação.

Este tipo de manutenção gera a diminuição da vida útil das máquinas e das instalações, além de serem necessárias paradas para manutenção em momentos aleatórios, e muitas vezes inoportunos por serem em épocas de ponta de produção, correndo o risco de ter que fazer paradas em períodos de cronograma apertado, ou até em épocas de crise geral.

3.1.3.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Sua aplicação tem como objetivo prevenir paradas e falhas de peças e componentes de diversos tipos de equipamentos através do planejamento de reparos em intervalos de tempo definidos. O monitoramento de maquinários é a maneira mais adequada de prevenir a interrupção das atividades, ou seja, o método mais eficaz para as empresas controlarem seus equipamentos sem necessitar desligá-los ou mesmo perdê-los por falta de manutenção.

Este tipo de manutenção é conhecido como Time Based Maintenance – TBM ou Manutenção Baseada no Tempo e deve ser a principal atividade de manutenção de uma indústria, sendo realizada periodicamente. É de grande importância sua

realização, pois atividades de inspeção, a reforma e troca de componentes são práticas da manutenção preventiva.

Apesar de ser uma estratégia amplamente utilizada na indústria, a manutenção preventiva não é a melhor solução para solucionar as falhas. Tal método ocupa a segunda opção de manutenção com maior custo no mercado, atrás somente da manutenção corretiva. Devido à periodicidade definida, a substituição de componentes que poderiam operar por mais algum tempo e a mão-de-obra utilizada nesse processo, aumentam os custos.

Um parâmetro que influencia na manutenção preventiva são os manuais dos fabricantes. Entretanto, não é possível confiar cegamente nestas informações, algumas vezes podem ser conservadoras demais, levando à uma intervenção prematura do equipamento, ou tardia, causando falhas antes do estimado.

3.1.3.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA

Consiste na técnica de manutenção que visa acompanhar os equipamentos e seus componentes através do monitoramento de dados estatísticos ou medições de parâmetros de processo. Dessa forma, é possível indicar as reais condições de funcionamento, e assim tentar prever a proximidade da ocorrência de uma falha.

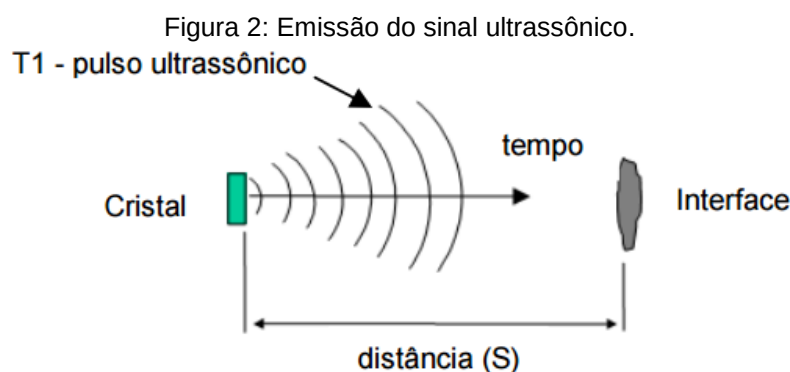
O monitoramento do processo deve ser feito periodicamente a fim de prever o tempo de vida útil de um determinado equipamento, definindo assim o momento certo de intervenção de uma linha de produção para efetuar a manutenção. Dessa maneira, será possível ter o aproveitamento máximo da vida útil do componente ou equipamento.

Existem diversas técnicas para monitorar os equipamentos a fim de aplicar a manutenção preditiva, porém as quatro mais usuais são o ensaio por ultrassom, análise de vibrações mecânicas, ferrografia e termografia.

“O ensaio por ultrassom caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais

variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos”. (ANDREUCCI R. 2011, p. 6).

As Figuras 2 e 3 mostram o princípio básico do ultrassom em ensaios não destrutivos utilizando a técnica pulso-eco. “O aparelho produz um pulso no instante (T1), esse se propaga pela peça, e neste instante (T1) o circuito de controle do aparelho inicia a contagem do tempo. Ao incidir numa descontinuidade (interface), Figura 2, que se encontra na distância (S), ocorre a reflexão da onda emitida pelo cristal que é representado pelo eco de reflexão na tela do aparelho de ultrassom.” (ANDREUCCI R., 2011, p. 42).



Fonte: ANDREUCCI, 2011, p. 42.



Fonte: ANDREUCCI, 2011, p. 42.

“O ensaio de vibrações mecânicas, em muitas indústrias, é um método indispensável na detecção prematura de anomalias de operação em virtude de problemas, tais como falta de balanceamento das partes rotativas, desalinhamento

de juntas e rolamentos, excentricidade, interferência, erosão localizada, abrasão, ressonância, folgas, etc.” (INFRAREDSERVICE, 2010).

A vibração pode ser considerada como um processo destrutivo devido aos sérios danos que causa nos equipamentos. O movimento repetitivo da vibração reduz a resistência do material consideravelmente, sendo que os maiores responsáveis por falhas em equipamentos são o desgaste e a fadiga.

“O ensaio de vibrações mecânicas é um método eficiente e imprescindível na detecção de problemas em equipamentos, tais como desbalanceamento, desalinhamento de juntas e acoplamento, excentricidade, folgas, problemas de engrenamentos e rolamentos defeituosos.” (INFRAREDSERVICE, 2010).

Os ensaios de vibração são os mais solicitados, especialmente na indústria como a eletrônica, automobilística, aeronáutica, aeroespacial, defesa e aplicações militares. Em todas estas áreas o produto ou as suas peças são geralmente submetidos à vibração durante a sua vida útil.

Figura 4: Análise de vibração mecânica.



Fonte: Soluções industriais.¹³

A Ferrografia consiste na determinação da severidade, modo e tipos de desgaste em equipamentos por meio da identificação da morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e tamanho das partículas encontradas em amostras de óleos ou graxas lubrificantes, de qualquer viscosidade, consistência e opacidade.

Há dois tipos de análises ferrográficas, a quantitativa e a analítica. A análise quantitativa consiste em determinar as concentrações de partículas contidas no óleo permitindo a criação de tendências com o histórico de ensaios. A análise analítica visa identificar os tipos e as causas do desgaste.

Esta técnica tem como objetivo determinar o momento adequado para a renovação do óleo de um componente lubrificado ou de um circuito hidráulico, gerando o grau de degradação ou de contaminação e buscando assim, economizá-lo através da otimização do intervalo entre as trocas. Como benefício de sua aplicação é possível listar o adiamento de paradas preventivas, aumento da vida útil e da segurança operacional, além de melhorias baseadas em dados científicos.

Figura 5: Análise ferrográfica.

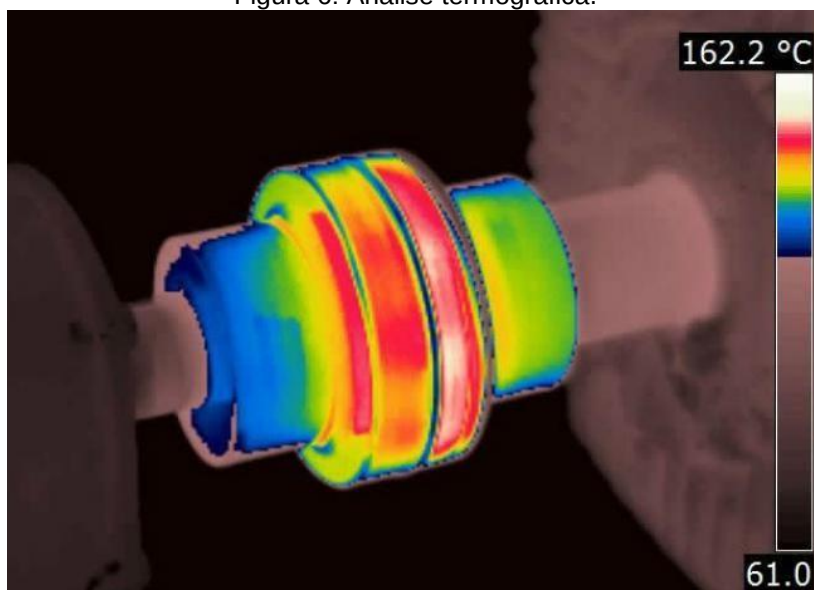


Fonte: Cepstrum Soluções em Confiabilidade.⁴

A termografia é uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva que permite mapear um corpo ou uma região com o objetivo de distinguir áreas de diferentes temperaturas, sendo, portanto uma técnica que permite a visualização artificial da luz dentro do espectro infravermelho. O infravermelho é uma frequência eletromagnética naturalmente emitida por qualquer corpo, com intensidade proporcional a sua temperatura. Tal método de análise hoje tem um papel muito importante na área de manutenção preditiva, permitindo identificar regiões ou pontos onde a temperatura está alterada com relação a um padrão pré-estabelecido. Através da sua utilização, é possível obter informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo, eliminando muitos problemas de produção, evitando falhas elétricas, mecânicas e fadiga de materiais.

Em um programa de manutenção preditiva, a termografia possui grande utilidade, pois além de proporcionar a detecção de falhas ainda no estágio inicial, permite a realização de medições sem contato físico com a instalação, oferecendo maior segurança para o executante. O fato de não necessitar de intervenção na produção para verificar o equipamento, possibilita inspeções de grandes superfícies em pouco tempo.

Figura 6: Análise termográfica.



Fonte: Mecatronica por Henner.⁶

3.1.3.4. MANUTENÇÃO DETECTIVA

Os tipos mais conhecidos de manutenção são corretiva, preventiva e preditiva. Porém, há uma importante técnica que visa garantir que os equipamentos e instalações continuem seguros e produtivos que é denominada manutenção detectiva.

Tal estratégia de manutenção é composta por dispositivos ou sistemas integrados de proteção que detectam automaticamente falhas imperceptíveis ao operador e ao mantenedor – falhas ocultas.

Segundo Alan Kardec (2009, p. 47), a manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.

A criação de sistemas de monitoramento individuais e interligados assegura a integridade do equipamento, do operador e do ambiente, forçando investimentos destinados a garantir a confiabilidade e segurança do sistema industrial.

3.2. CONFIABILIDADE

Pela ABNT NBR 5462 (1994, p. 2), é a probabilidade de um equipamento, célula de produção, planta ou qualquer sistema funcionar normalmente em condições de projeto, por um determinado período de tempo preestabelecido. A confiabilidade está associada ao grau de certeza de que há um bom funcionamento do equipamento em um período de tempo.

Projetistas e construtores do passado, de todos os âmbitos da criação, tinham como particularidade a busca constante por projetos altamente confiáveis. A comparação entre passado e atualidade é essencial para mensurar a o nível de confiabilidade. Uma das finalidades desse parâmetro é definir o nível de segurança utilizado em um projeto, uma vez que tradicionalmente essa escolha é arbitrária, considerando que não se conhece todas as variáveis do projeto.

3.2.1. PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE

3.2.1.1. CURVA DA BANHEIRA

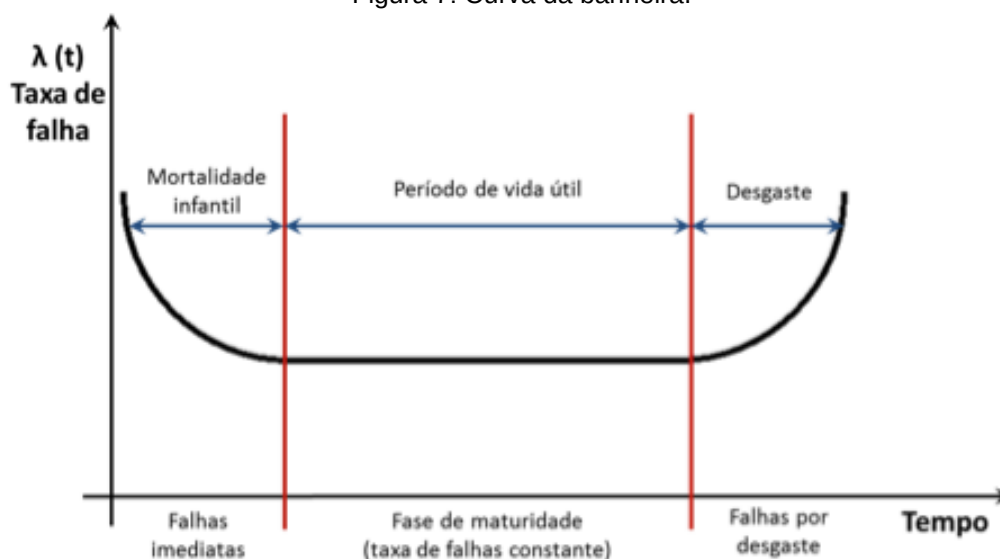
A curva da banheira ilustra o comportamento típico de um equipamento/componente com relação à taxa de falhas ao longo do tempo.

Os registros de manutenção apontam que usualmente um equipamento tem, no início de sua vida útil, uma taxa elevada de falhas, devido a problemas de fabricação, instalação inadequada, componentes defeituosos, montagem incorreta. Esta fase é denominada “mortalidade infantil”. Com o passar do tempo, estas falhas são corrigidas, e o equipamento entra em um patamar de estabilidade, com uma

taxa de falhas constante. As falhas, quando ocorrem são aleatórias, devido a erros de operação e manutenção do equipamento.

No fim da vida útil, variável conforme as condições de uso e agressividade do ambiente em que o equipamento se encontra, a taxa de falhas começa a aumentar, devido ao desgaste dos componentes. A representação gráfica deste comportamento é a chamada curva da banheira.

Figura 7: Curva da banheira.



Fonte: Adaptado de Lafraia, 2001, p. 50.

3.2.1.2. INDICADORES DE MANUTENÇÃO

“Definida a real situação, se propõe desafios para a melhoria, se escolhe os meios, e se começa a acompanhar a evolução da ação humana mantenedora, através dos índices de manutenção”. (VIANA, 2002, p.139). Os indicadores, ou índices de manutenção são dados chave para acompanhamento de desempenho da manutenção em seus aspectos gerais e, assim, garantindo a melhor tomada de decisão.

Existem seis chamados “Índices de Classe Mundial” (utilizados pela maioria dos países ocidentais), eles são “Tempo médio entre falhas (TMEF)”, “Tempo médio de reparo (TMR)”, “Tempo médio para falha (TMPF)”, “Disponibilidade física da Maquinaria”, “Custo de Manutenção por Faturamento”, “Custo da Manutenção por

Valor de Reposição“. Além dos citados, ainda existem outros que desempenham grande importância no planejamento e controle da manutenção: “Backlog”, “Retrabalho”, “Índice de Corretiva”, “Índice de Preventiva”. O índice de disponibilidade será tratado como tópico separado, pois é de maior importância para este trabalho. Tratar-se-á sobre a aplicabilidade e significado dos demais que são de imprescindível compreensão no presente trabalho:

- a) TMEF – TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS: definido como divisão das horas disponíveis do equipamento para operação pela quantidade de manutenções corretivas nele durante o período. “Indica o comportamento da maquinaria, diante das ações mantenedoras” (VIANA, 2002, p.142). Mostra se o equipamento está sofrendo menos ou mais ações corretivas durante uma quantidade de tempo. Quanto menor, mais positivo seu resultado.
- b) TMR – TEMPO MÉDIO DE REPARO: divisão das horas de indisponibilidade de operação pertinente a manutenção pela quantidade de intervenções corretivas no período. Mostra o tempo necessário para a intervenção em certo equipamento e quanto menor, menos impacto teria na produção.
- c) TMPF – TEMPO MÉDIO PARA FALHA: Para equipamentos em que as falhas neles significam descarte. Consiste na divisão entre a quantidade de horas disponíveis para operação e o número de falhas em componentes desta natureza – não reparáveis.
- d) BACKLOG: define como o tempo necessário que a equipe deve trabalhar, sem chegada de novas ordens de serviço, para concluir os serviços pendentes. Importante relação entre a capacidade de atender o serviço com a demanda.
- e) INDICE DE CORRETIVA – “O índice retrata a situação da ação, planejamento e programação, indicando o percentual das horas de manutenção que foram dedicadas em corretiva”. (VIANA, 2002, p.153). Não é ideal que o índice ultrapasse 50%, visto que o controle e as áreas executantes da manutenção atenderão frequentemente reclamações devido a eventuais corretivas.
- f) INDICE DE PREVENTIVA – Trata-se do mesmo índice anterior, porém tratando-se de manutenções preventivas. Com valores acima de 75%, o processo estará com tranquilidade, rotina bem definida e liberação de recursos para busca da melhoria continua.

3.2.1.2.1. DISPONIBILIDADE

Dá-se pela relação entre as horas trabalhadas do equipamento pelas horas totais no período. De acordo com a ABNT NBR 5462 (1994, p. 2):

Capacidade de um item estar em condições de executar uma 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.

Importante para ter o controle da porcentagem em que o equipamento está disponível para uso. Este índice considera o tempo de trabalho e de stand-by.

3.2.1.3. MANUTENABILIDADE

Também chamado de manutenibilidade, é a probabilidade de o equipamento voltar a condições de operação dentro de um determinado tempo, ao ser aplicado uma intervenção. A ABNT NBR 5462 (1994, p. 3), designa:

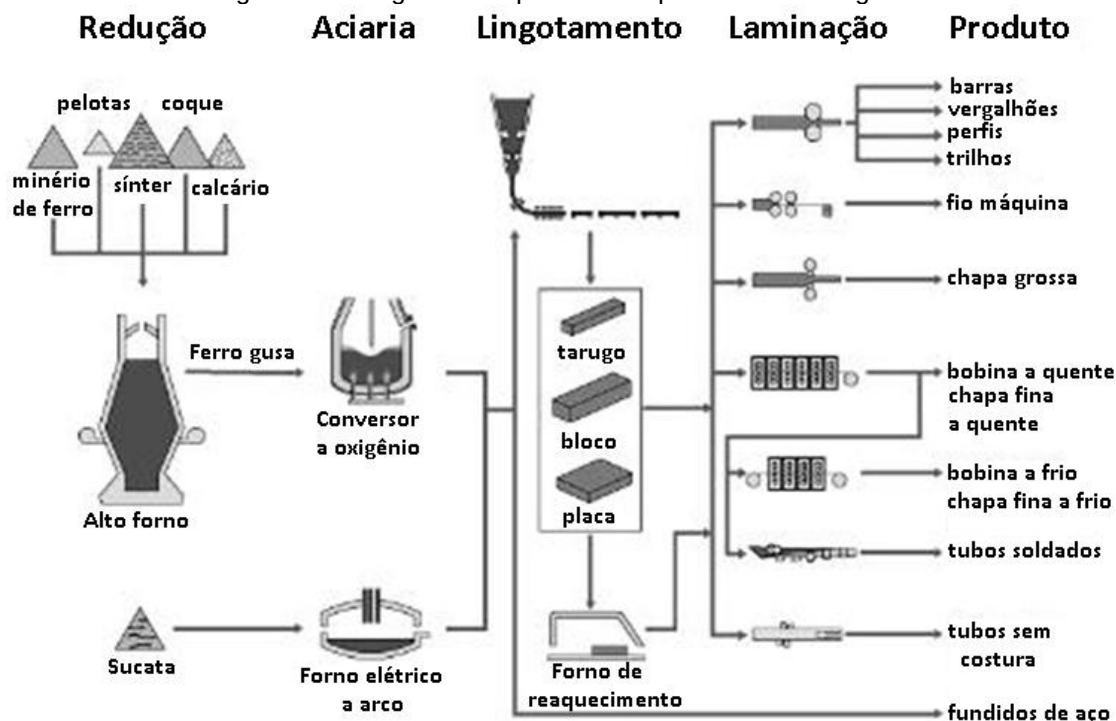
Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.

3.3. O PROCESSO SIDERÚRGICO

Segundo Mourão (2007, p.14), “As usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e semi-integradas. Usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro nos altos-fornos. O produto do alto-forno, chamado ferro-gusa, é transformado em aço através da operação de conversão. Na usina semi-integrada, o aço é obtido a partir de ferro secundário, ou seja, a matéria-prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. A sucata é transformada novamente em aço comercial por meio do emprego de fornos elétricos de fusão, recicladoras de aço.”

Existem dois tipos de siderurgia, a integrada e a não integrada. “Em uma moderna usina siderúrgica integrada, o processo que vai das matérias-primas ao produto final é constituído pelas seguintes etapas principais: extração do ferro de seu minério nos altos-fornos; a conversão do ferro gusa, produto intermediário, em aço; o lingotamento do aço líquido de forma a solidificar em forma conveniente para as operações seguintes; e, finalmente, a conformação do metal na forma de produto. Em siderúrgica semi-integrada, o processo começa com a fusão da sucata de aço em forno elétrico a arco, e depois segue basicamente o mesmo procedimento das integradas.” (MOURÃO, 2007, p.15)

Figura 8: Fluxograma simplificado do processo siderúrgico.



Fonte: MOURÃO et al, 2007, p. 15.

As principais matérias-primas do processo são minério de ferro, carvão mineral e calcário dentre outros muitos outros insumos e utilidades que são aplicados.

“Procura-se otimizar as misturas de minérios de ferro, como também dos carvões minerais, objetivando menor custo com a melhor qualidade possível. Essa fase é feita através da formação de pilhas, com os minérios e os carvões dispostos em camadas horizontais em suas pilhas respectivas. O material da pilha é recuperado por cortes transversais utilizando o *reclaimer* - máquina recuperadora de material empilhado -, que envia esse material para a *sinterização*, no caso de minérios, ou para a *coqueria*, no caso de carvões minerais.” (MOURÃO et al, 2007, p.15)

A sinterização é um processo de aglomeração dos minérios de ferro, realizada com o aquecimento do minério por uma frente de combustão alimentada por ar succionado que percorre da superfície até o fundo da camada, ocasionando uma ligação incipiente que produzirá o colamento entre as partículas de minério de ferro.

“A mistura de carvões é enviada à coqueria, onde sofrerá o processo de coqueificação, resultando no coque. Como subprodutos, têm-se substâncias carboquímicas, que são purificadas e vendidas, e o gás de coqueria (GCO), que é utilizado como combustível complementar do balanço energético da usina. Tanto o sínter como o coque são enviados para silos, processo denominado silagem. Estes silos têm sistemas dosadores, importantes na formulação da carga usada no processo de produção do gusa, que é o produto resultante da redução do minério de ferro.” (MOURÃO, 2007, p.16)

O alto-forno recebe sínter de minério de ferro, coque e ar aquecido para produzir o gusa, escória e o gás de alto-forno (BFG), gás que sai pelo topo do alto-forno.

O setor da aciaria na usina siderúrgica é responsável pelo refinamento do gusa para a obtenção do aço. Nas usinas integradas, atualmente, utiliza-se o processo a oxigênio para converter o gusa. Neste caso, um fluxo de oxigênio é lançado diretamente à superfície de banho, oxidando controladamente o gusa.

“Uma grande conquista do setor da aciaria é o lingotamento contínuo que, além de minimizar problemas de superfície dos lingotes, já apresenta uma geometria de placa pronta para a laminação, sem passar pelo processo de laminação de desbaste. A placa obtida por tal processo é um produto intermediário, que pode ser vendido no mercado nacional ou internacional ou processado na própria usina.” (MOURÃO et al, 2007, p.18)

Grandes investimentos foram feitos recentemente no intuito de diminuir e de captar possíveis emissões de materiais nocivos ao meio ambiente e à saúde. A preocupação com o meio ambiente é hoje tema central na siderurgia e a prática de reciclar internamente os resíduos gerados no processo siderúrgico já está sendo implementada pela maior parte das usinas.

3.3.1. O ALTO-FORNO

O alto-forno é um equipamento destinado a produzir ferro-gusa em estado líquido a uma temperatura em torno de 1500°C, com a qualidade e em quantidade necessárias para o bom andamento dos processos produtivos subsequentes. Para isso, o alto-forno utiliza como matérias-primas básicas a carga metálica (sínter, pelotas, minério granulado) e o combustível sólido (coque ou carvão vegetal), além de fundentes e injeções auxiliares (gás natural, carvão pulverizado, etc.). (MOURÃO et al, 2007, p. 55).

Em termos práticos, sínter, minérios, pelotas e coque são carregados pelo topo enquanto o ar é insuflado pelas ventaneiras na parte inferior do forno. O coque é queimado e gases redutores são gerados em alta temperatura. Esses gases ascendentes em contato com a carga de minérios descendentes reagem, reduzindo e fundindo o minério originando o ferro-gusa (principal produto) e escória que são vazados do forno para as casas de corrida.

Tratando-se dos produtos do alto-forno, o ferro gusa é o principal. Além disso, o gás de alto-forno, o pó de alto-forno e a escória de alto-forno são recuperados como subprodutos.

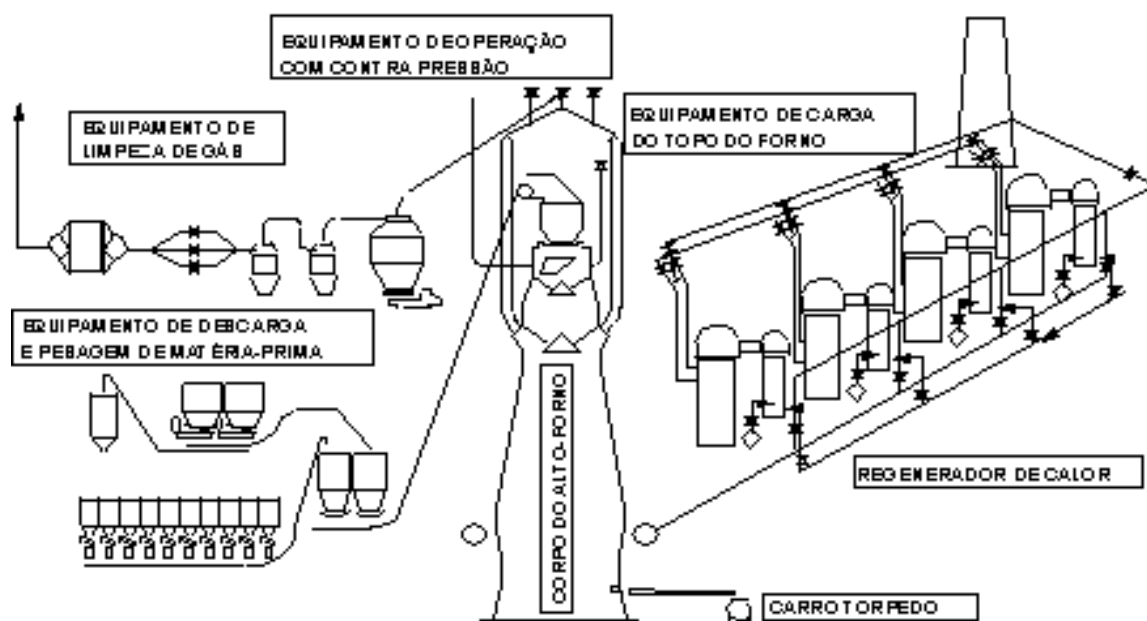
O gás de alto-forno, ou BFG, contém de 21 a 25% de CO, 18 a 22% de CO₂, 2 a 5% de H₂ possuindo 700 a 800 kcal/Nm³ de poder calorífico e por isso ele é recuperado e usado como combustível. O pó recolhido pela planta de limpeza é formado pelo recolhido no balão de pó (Dust Catcher) e pelo pó úmido recolhido nos "Venturi Scrubber" e/ou precipitadores elétricos.

Para a avaliação do desempenho operacional de um alto-forno para possibilitar um retorno econômico dos investimentos, necessita-se que apresente: uma vida útil elevada (devido ao altíssimo investimento na construção ou reforma; estima-se a vida útil de um alto-forno – campanha – na faixa de 12 a 18 anos, apesar de haver altos-fornos com mais de 20 anos), alta produtividade (razão entre produção média diária e o volume interno do alto-forno – toneladas/dia/m³; a média atual fica ente 1,8t/dia/m³ a 2,8 t/dia/m³ e depende diretamente da idade do forno, das particularidades de cada usina, da permeabilidade da carga, das condições de

mercado, da ocorrência de problemas operacionais, da disponibilidade de oxigênio para enriquecimento do ar soprado, entre outros), baixo consumo de combustível (coque metalúrgico, carvão pulverizado pelas ventaneiras) e qualidade adequada (devendo estar dentro dos padrões exigidos pelo processo – composição química e temperatura correta – e o coque dentro da composição correta para destinação a sua utilização posterior).

O Alto-forno de maneira geral é constituído de equipamentos de descarga e pesagem de matérias primas, equipamentos de carga no topo do forno, o forno propriamente dito, equipamentos para operação de alta pressão e os regeneradores de calor.

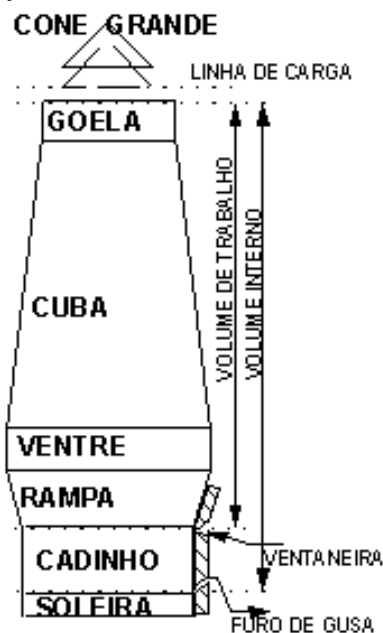
Figura 9: Alto-forno e equipamentos adjacentes.



Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos) (Adaptado).

O alto-forno em si é composto da carcaça, de refratários e do sistema de resfriamento. O esquema da carcaça encontra-se na figura abaixo.

Figura 10: Carcaça do alto-forno demonstrando suas regiões.



Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos) (Adaptado).

Todas as regiões do alto-forno são projetadas matematicamente coerentes para garantir a interdependência entre elas, e dessa forma atingir a eficiência pré-estabelecida.

A goela é a secção através da qual a carga é carregada no Alto-forno a partir dos equipamentos de distribuição da carga. Além deles, há diversos sensores que medem o nível da carga, a temperatura e a composição dos gases produzidos, etc. A armadura fixa é usada como revestimento na parede interna da goela para evitar abrasão causada pela carga, geralmente é feita de ferro fundido ou aço.

O diâmetro interno de cuba cresce à medida que se desce ao longo dele e é conectado ao ventre. O formato se deve em parte à necessidade de compensar o aumento de volume de carga, devido à elevação da temperatura e em parte para possibilitar uma descida de carga suave e sem agregar pedaços de material semifundido nas paredes. Esta região é revestida por tijolos refratários e compreende a maior parte volumétrica do alto-forno.

O ventre possui o maior diâmetro do alto-forno, e está sujeito a severas condições de desgaste de seus refratários devido à intensa oscilação de temperatura em função da variação de posição da zona compreendida entre os pontos de

amolecimento e fusão da carga metálica – zona coesiva. A espessura dos tijolos varia de 800 a 1000 mm. Para proteção, sistemas de refrigeração são utilizados para garantir maior vida útil desta região.

A rampa é um cone invertido ligando o ventre ao cadinho. Normalmente, tijolos de carbono são usados no seu revestimento, com espessuras de 500 a 800 mm. O resfriamento do alto-forno é feito através de caixas de refrigeração interna chamada de Stave Cooler.

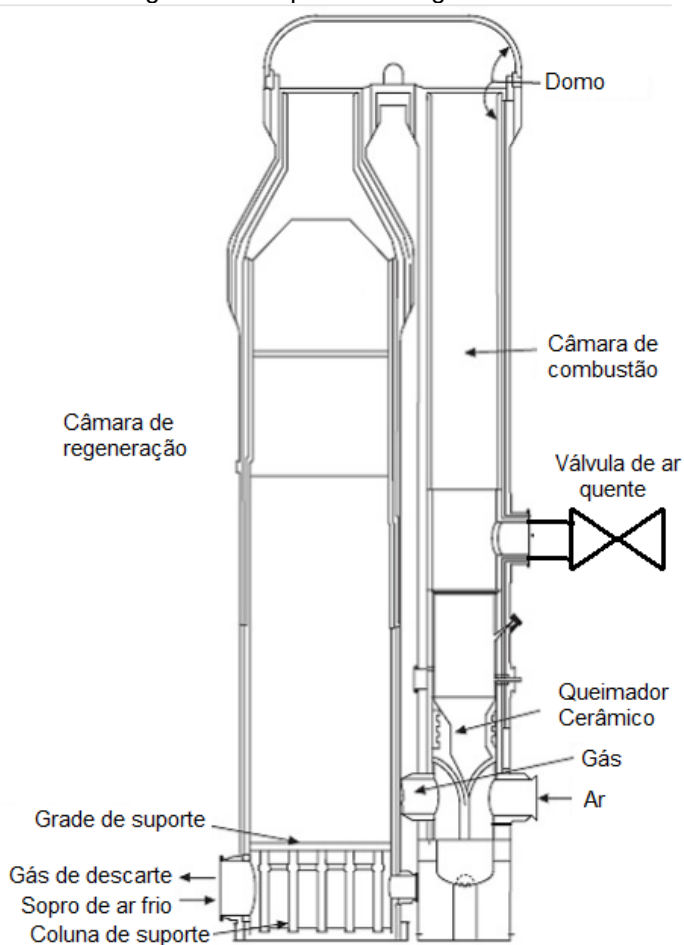
O revestimento interno do cadinho é feito de grandes blocos de carbono. Uma de suas funções é armazenar, por tempo controlado, o gusa e a escória produzidos. Nos níveis de 700 a 2000 mm acima do fundo existem os furos de gusa. Os vazamentos são efetuados de 9 a 15 vezes por dia, buscando sempre o menor número de vazamentos. Cerca de 30 a 40 ventaneiras são colocadas na parte superior do cadinho, todas no mesmo nível e com a distribuição mais uniforme possível. Na parte superior do cadinho, ficam as ventaneiras, onde é feita a injeção do ar soprado e de combustíveis auxiliares. Elas são submetidas às temperaturas muito elevadas, ao ataque de partículas incandescentes e gotejamento de gusa e escória. As ventaneiras são geralmente feitas de cobre, e possuem um sistema eficiente de refrigeração por água.

3.3.2. OS REGENERADORES

São trocadores de calor e tem como principal função aquecer o ar injetado através das ventaneiras usando a combustão de gás BFG e gás da coqueria. O regenerador recebe o gás a temperatura entre 150⁰C a 200⁰C vindo dos sopradores, chamado de ar frio, e aquece até a faixa de 1000⁰C a 1500⁰C que é então denominado ar quente.

O gás misto e o ar entram em um queimador na base do regenerador onde é feita a mistura e dá-se início a combustão. Na câmara de combustão é feita a queima completa do gás misto. A câmara tem grande altura e diâmetro, para evitar o impacto da chama no domo e para alargar mais a chama. O domo é a parte superior do regenerador e tem por finalidade inverter em 180° o sentido dos gases queimados e distribuir os gases para o empilhamento de tijolos refratários durante o aquecimento. Na fase de sopro, o sentido do ar quente é inverso. O empilhamento é constituído de tijolos refratários perfurados, dispostos um sobre os outros e tem por finalidade absorver o calor na fase de aquecimento. O empilhamento é sustentado por uma série de colunas de ferro fundido [...].(MOURÃO et al, 2007, p. 77).

Figura 11: Esquema do regenerador.



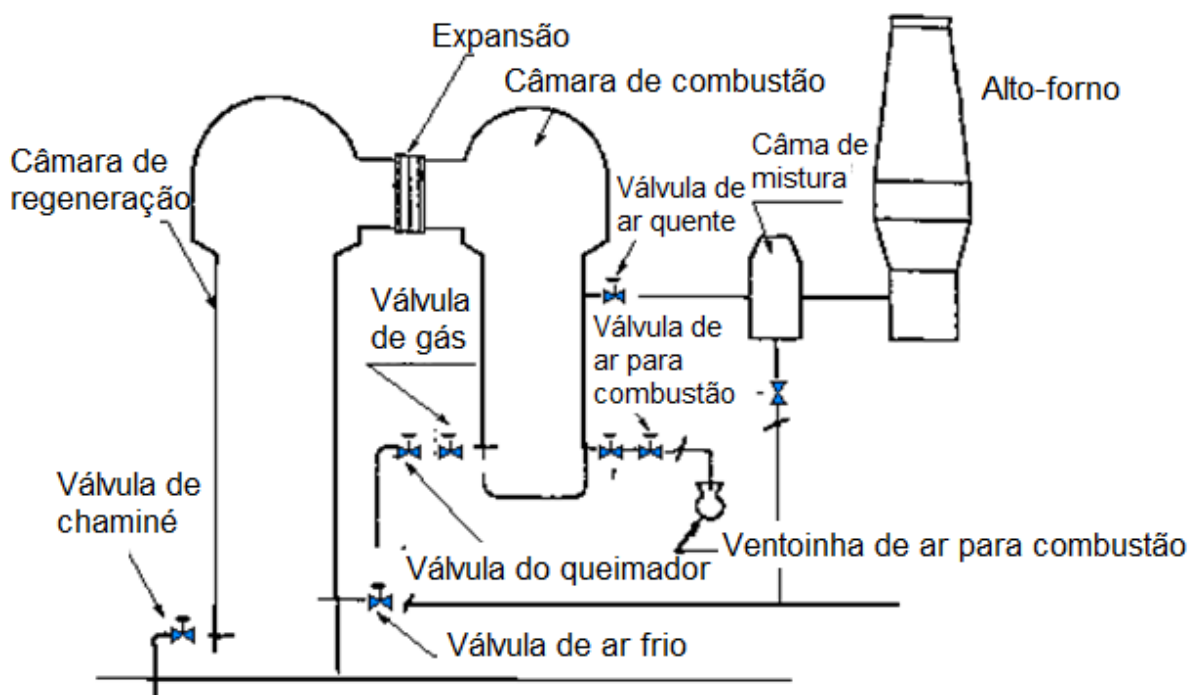
Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos) (Adaptado).

No geral, existem quatro fases em que se pode encontrar o regenerador: em aquecimento (quando está ocorrendo combustão e aquecendo o empilhamento), em sopro (quando o regenerador sopra o ar quente para o alto-forno), abafado (quando já está aquecido porem isolado devido às válvulas estarem fechadas) e manobrando (na fase intermediária entre todas as outras).

É comum que os altos-fornos tenham conjunto de três a quatro regeneradores funcionando em ciclos – enquanto um ou dois estão soprando ar quente para o forno, o restante está em fase de aquecimento.

Os principais elementos que compõem um regenerador são: carcaça de aço, refratários, válvulas e expensor esquematizados:

Figura 12: Sistema de insuflamento de ar quente do alto-forno.



Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos) (Adaptado).

3.4. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

3.4.1. CONCEITO E OBJETIVOS

Segundo Moubray (1997, p. 7), a definição formal de manutenção centrada em confiabilidade seria: “processo usado para determinar a necessidade de manutenção de qualquer ativo físico no contexto operacional”. Seus principais objetivos são: assegurar que os níveis de segurança e confiabilidade dos equipamentos sejam alcançados, recuperar níveis de segurança e confiabilidade mesmo com o envelhecimento dos equipamentos, recolher os dados para desenvolvimento de melhorias nos pontos fracos e implantar com o menor custo.

3.4.2. HISTÓRICO E NORMATIZAÇÃO

A primeira metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade foi apresentada por Nowlan e Heap, em 1978, para desenvolver um programa de manutenção. Eles queriam avaliar a confiabilidade das aeronaves e de equipamentos militares, baseado na experiência deles dentro da United Airlines, para minimizar os custos com manutenção.

Em 1992, as normas IEC 60706-4/60300-3-11 forneceram as orientações para desenvolver uma programação inicial de manutenção preventiva utilizando as técnicas propostas pelo MCC, de âmbito internacional e especialmente voltado para instalações elétricas. Por volta dos anos 2000, à luz de John Moubray (que, junto com seus colaboradores, auxiliou a aplicação da MCC em diversas empresas) e das literaturas que existiam no momento, são publicadas as normas SAE JA1011/JA1012 justamente para atender a demanda por um padrão que delineasse os requisitos que um programa de gestão da manutenção deveria cumprir para ser classificado como MCC. Esta última aplica-se a empresas e setores diversos, além da aviação, dando especial tratamento às questões ambientais.

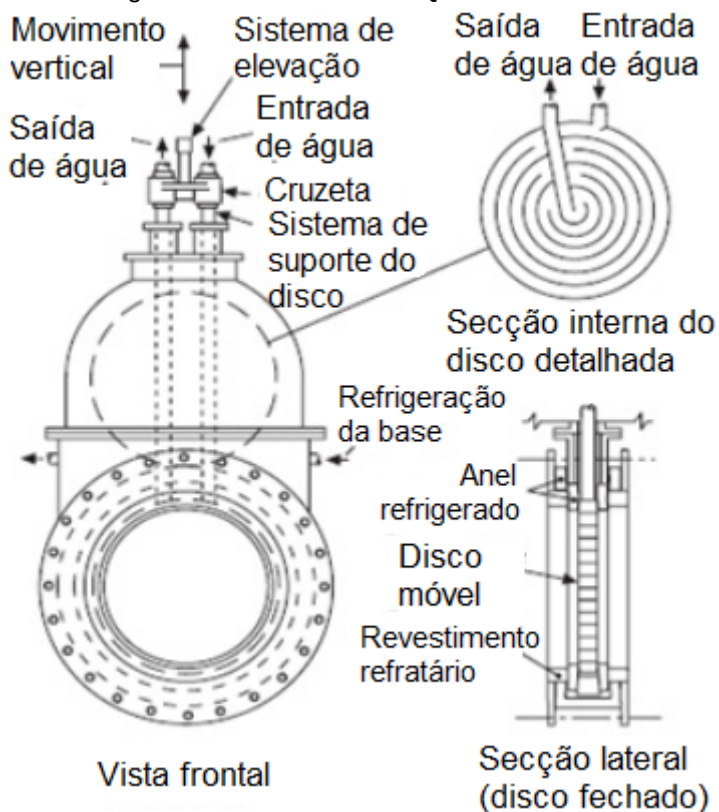
Mais tarde, surgiram normas específicas para ABS (American Bureau of Shipping) e para NASA (National Aeronautics and Space Administration) criadas para auxiliar a implantação dos conceitos e dar suporte à MCC dentro de suas instalações. Reforçando ainda mais a prática, importância e credibilidade do método para alcançar a melhoria de resultados.

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1. VÁLVULAS DE AR QUENTE

Os altos-fornos de um modo geral possuem três ou quatro regeneradores que se revezam na responsabilidade de suprir a demanda de ar quente necessária ao processo. O controle de troca dos regeneradores visa à manutenção constante da temperatura. Este revezamento necessita de manobras com os diversos equipamentos do Sistema de Ar Quente, dentre eles a Válvula de Ar Quente (VAQ), que se destaca por ser a responsável pelo bloqueio do ar para o alto-forno enquanto o regenerador estiver em fase de aquecimento, conforme determina a operação. O desenho técnico da mesma encontra-se no ANEXO A.

Figura 13: Desenho da VAQ com detalhes.



Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos) (Adaptado).

As válvulas possuem um sistema de resfriamento por água e ficam entre o regenerador e o “Tubulão de Ar Quente”. São dispostas com uma pequena distancia do regenerador para reduzir o recebimento de radiação provinda dos gases da queima.

Estas válvulas são de corpo fundido ou construído em chapas soldadas. Se de chapas soldadas, são providas de materiais mais nobres na região das sedes do disco e do corpo, como por exemplo, o DIN 15 MO3. O desempenho destas válvulas, tanto na ArcelorMittal Tubarão quanto nas outras usinas está baseada fortemente na proteção refratária das sedes, projeto do regenerador (diâmetro do duto de saída influencia na velocidade), ciclo de regeneradores (quantidade de regeneradores operando) e na qualidade da água. Exigem refrigeração com circuito fechado e água desmineralizada.

Se de corpo fundido, as válvulas possuem o mesmo feito em aço fundido, anéis e disco de cobre com alguma proteção refratária em locais determinados do corpo.

As válvulas em construção fundidas com internos de cobre são mais confiáveis que as válvulas em construção soldadas, pois podem operar alguns dias quando é detectado um vazamento de água. Uma grande vantagem para a válvula de construção fundida é a possibilidade de recuperação com aproveitamento da carcaça metálica e substituição dos internos de cobre.

4.2. PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE

O MCC pode ser sistematizado respondendo sete questões sequenciais com ferramentas de modelagem e análise que documentam os critérios e informações usadas na resolução de cada questão (MOUBRAY, 1997, p. 7):

- 1- Quais são as funções e padrões de desempenho do ativo no seu contexto atual de operação?
- 2- De que forma ele falha em cumprir sua função?
- 3- O que causa cada falha funcional?
- 4- O que acontece quando ocorre cada falha?
- 5- De que modo cada falha importa?
- 6- O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?
- 7- O que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa pró-ativa apropriada?.

É importante salientar que a aplicação do MCC demanda tempo e mobilização de recursos, por tanto, para que um sistema receba esta metodologia de análise, ele deve apresentar um elevado custo com a manutenção preventiva, ter um elevado índice de corretivas dispendiosas ou implicações de segurança e meio ambiente. Segundo a SAE JA1011 (2009, p. 7):

Qualquer processo MCC deve assegurar que os seguintes passos foram desempenhados na sequência:

- a) Determinar o contexto operacional dos equipamentos e as funções associadas ao seu padrão de desempenho.
- b) Determinar como o equipamento pode falhar em desempenhar suas funções.
- c) Determinar as causas para cada falha funcional.
- d) Determinar o que acontece quando cada falha ocorre
- e) Classificar as consequências da falha
- f) Determinar o que deve ser feito para prever ou prevenir cada falha
- g) Determinar se outra estratégia de gerenciamento de falha pode ser mais efetiva.

4.2.1.1. IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA

Sobre esta etapa do processo, Moubray (1997, p 35) diz:

Todos os equipamentos possuem mais de uma função. Se o objetivo da manutenção é assegurar que ele continue a desempenhar estas funções, então todas elas devem ser identificadas em conjunto com seu padrão de desempenho.

Definir precisamente as funções que o equipamento em questão deveria desempenhar requer muito trabalho em equipe e experiência das pessoas envolvidas. As funções são divididas em duas categorias principais: primárias e secundárias.

As funções chamadas de primárias são aquelas que se tornam os principais motivos para aquisição do equipamento ou dele existir. Por exemplo, uma máquina de empacotar tem como função primária empacotar.

Muitas das vezes, ao se adquirir um equipamento, espera-se que ele realize outras funções do que a sua principal. Estas são chamadas de funções secundárias. Por exemplo, ao comprar um carro, além de sua função primária que seria transportar cinco pessoas em maior velocidade que a pé, espera-se que o carro possa ter um porta-malas, indicador de combustível, dentre outras. Nesta categoria, as funções

podem ainda ser divididas em: funções ambientais, de segurança estrutural, de controle/contenção/conforto, estéticas, proteção, econômicas (visando eficiência) e supérfluas.

4.2.1.2. ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS

Se por qualquer razão, o equipamento for incapaz de realizar a demanda, o usuário considera o mesmo como se estivesse falhado. Ainda pela ABNT NBR 5462 (1994, p. 3), falha é definida como “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”. O modo de falha seria, portanto, o mecanismo que levou a falha a acontecer.

Segundo Mobray (1997, p. 59), uma vez identificado o modo de falha, torna-se possível prever seu motivo e assim decidir o deveria ser feito para antecipar, prevenir, detectar ou corrigir o mesmo.

Diversos métodos de análise de confiabilidade foram desenvolvidos com o passar dos anos. Dentre eles podemos citar o Método de Markov, Análise de Árvore de Falha (FTA) e a FMEA ou Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos – que é o mais utilizado na Manutenção Centrada na Confiabilidade.

Criado no começo dos anos 50, a FMEA é o método que ajuda a “reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo, identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas, e documentar o estudo, criando um referencial técnico que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo” (FOGLIATTO, 2011, p. 173).

Um dos momentos importantes ao realizar a FMEA é a Matriz de Decisão, pois ela evidencia qual a rotina de manutenção (se existir) a ser realizada e quais falhas são graves suficientes para o reprojeto ser preconizado. O fluxograma utilizado foi sugerido por Moubray e encontra-se traduzido no ANEXO B.

Fundamentalmente, a FMEA elaborada para este trabalho consiste no preenchimento das seguintes partes em um formulário:

CABEÇALHO: é particular de cada empresa. Em geral contem o número da FMEA, a identificação do item, o modelo ao qual ele corresponde, o departamento responsável pelo estudo, os dados do coordenador do estudo, os dados dos participantes e a data do documento.

ITEM/FUNÇÃO: [...] As primeiras colunas compreendem a especificação do item e sua função. Isso pode exigir, por exemplo, quatro colunas: (i) subsistema, (ii) conjunto, (iii) componente, (iv) função.

FALHA FUNCIONAL: neste momento inicia o trabalho técnico propriamente dito. Os participantes da equipe analisam o primeiro item e indicam as falhas funcionais potenciais.

MODOS DE FALHA: os efeitos potenciais de falha são definidos como aqueles defeitos, resultantes dos modos de falha, conforme seriam percebidos pelo cliente. Em geral, a cada falha funcional corresponde a um modo de falha. Contudo, pode haver exceções.

CAUSAS/MECANISMOS POTENCIAIS DE FALHA: esta é uma das etapas mais importantes do estudo, na qual se busca identificar a raiz do problema. [...] Dois aspectos contribuem para a FMEA gerar resultados consistentes: (i) o trabalho em equipe, que permite somar conhecimentos, e (ii) o trabalho sistemático, que contribui para garantir que todos os elementos serão considerados. [...] Causas de falha típicas são: especificação incorreta de material, vida útil inadequada, sobrecarga, lubrificação insuficiente, proteção insuficiente ao ambiente, algoritmo incompleto ou incorreto etc. Enquanto mecanismos de falha típicos podem ser citados: fadiga, escoamento, instabilidade elástica, deformação lenta, desgaste, corrosão, fusão etc.

SEVERIDADE (S): neste item é feita uma avaliação qualitativa de severidade do efeito listado na coluna anterior. [...] A severidade é medida por uma escala de 1 a 10, onde 1 significa o efeito pouco severo e 10 significa efeito muito severo. A severidade aplica-se exclusivamente ao efeito. A equipe de FMEA deve chegar a um consenso a respeito do critério a ser utilizado e, então, usá-lo consistentemente.

OCORRÊNCIA (O): a ocorrência relaciona-se com a probabilidade

que uma causa ou mecanismo listado anteriormente venha a ocorrer. [...] A avaliação da ocorrência também é feita usando-se uma escala qualitativa de 1 a 10. O critério usado na definição da escala deve ser consistente, para assegurar continuidade nos estudos. [...] No caso em que dados quantitativos estão disponíveis (dados de campo ou resultados de uma análise de engenharia numérica/experimental), a seguinte fórmula reproduz aproximadamente os valor da ocorrência (expressos na escala 0 a 10) a partir da taxa de falha estimada:

$$\text{Ocorrência} = (\text{Taxa de Falha} / 0,000001)^{0,20}.$$

DETECÇÃO (D): a detecção refere-se a uma estimativa da habilidade dos controles atuais em detectar causas ou modos potenciais de falha antes de o componente ou subsistema ser liberado para produção. Também é usada uma escala qualitativa de 1 a 10, onde 1 representa uma situação favorável (modo de falha será detectado) e 10 representa uma situação desfavorável (modo de falha, caso existente, não será detectado). Para reduzir a pontuação, é necessário melhorar o programa de validação/verificação do projeto (PVP). Como sempre, o critério de avaliação deve ser definido por consenso e, então, utilizado com consistência.

RISCO / RISK PRIORITY NUMBER (RPN): o risco é calculado para priorizar as ações de correção e melhoria do projeto. No cálculo do risco leva - se em conta a severidade, ocorrência e detecção. A fórmula em geral empregada para a avaliação do risco é a multiplicação simples desses três itens, conforme segue:

$$\text{RPN} = S \times O \times D.$$

AÇÕES RECOMENDADAS: devem se dirigir aos itens com maior risco. As ações recomendadas devem ser de tal natureza que reduzam a severidade do efeito, a probabilidade de ocorrência ou a probabilidade de não detecção. [...] Objetivamente, as ações recomendadas representam o que será corrigido e melhorado no projeto. Assim, elas constituem o principal resultado da FMEA. (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009, p. 177-185)

O detalhamento dos seus modos de falha deve ser suficiente para ser possível uma selecionar uma diretriz adequada de tratamento desta falha, sendo desejável que

haja níveis de causas até chegar a uma causa raiz. Não se deve tentar listar todas as falhas possíveis. Segundo Siqueira (2012, p. 63):

Uma vez adotada, para ser efetiva, a FMEA deve ser mantida atualizada, devendo, para isto, ser aplicada a todas as novas aquisições de equipamentos, após cada modificação em um sistema existente, e a todos os itens operacionais submetidos ao processo da MCC. Em particular, cada ocorrência de falha deve desencadear um processo de verificação e possível revisão do estudo FMEA correspondente.

5. RESULTADOS

Devido a importância da válvula de ar quente no processo de fabricação do gusa, justifica-se o uso da MCC para o estudo aprofundado das suas falhas visando aumentar a confiabilidade do sistema. Como ferramenta para desenvolver o estudo, foi escolhida a FMEA por ser um método proativo e permitir o constante aprimoramento da análise.

O primeiro passo é criar uma FMEA adequada para o equipamento e os padrões da empresa. Neste momento, deve-se recorrer a uma equipe multidisciplinar para determinar qual seriam as funções associadas, os modos de falha seguidos de seus efeitos, classificação (severidade, detectabilidade, ocorrência e velocidade de degradação – são definidos seguindo a orientação da tabela presente no APÊNDICE A) e por fim as ações propostas. Sabe-se que a FMEA é uma ferramenta que deve ser constantemente atualizada de acordo com o conhecimento de colaboradores de todas as áreas envolvidas com o equipamento. Portanto, no presente trabalho, será apresentada a versão inicial para a VAQ, podendo ser atualizada com estudos futuros.

A planilha elaborada como a FMEA para este caso encontra-se no APÊNDICE B. É interessante observar os modos de falha com maior RPN, fator que combina as classificações, pois indica maior criticidade do risco.

A coluna de “Matriz de decisão do MCC” é baseada no fluxograma de atividades proposto pelo Moubray. Sua informação indica se existe possibilidade de haver uma ação preventiva para o modo de falha, se não tiver, a ação deve ser corretiva ou até o reprojeto. Este é o caso da interferência de corpos estranhos no interior do duto que afeta a abertura e fechamento completo da válvula – não é possível prever tal acontecimento. Esta situação gera danos ao disco que possibilita trincas e vazamentos de água. É necessária reavaliação do projeto e instalação do revestimento refratário do duto e compensadores próximos à VAQ.

A deficiência do sistema de refrigeração acarreta problemas como o agarramento dos discos das sedes devido ao empenamento das partes de cobre, podendo não assegurar o fluxo de ar quente para o alto-forno e acarretar até uma parada de alto-forno para troca completa da VAQ; pode ainda comprometer a refrigeração dos internos da válvula, gerando trincas tanto na carcaça quanto no disco e sede. Neste último caso, o possível vazamento de água para o interior do regenerador e/ou alto-forno podem causar instabilidade operacional. Para sanar o problema as principais ações propostas seriam: criar plano ou procedimento de inspeção no sistema de refrigeração utilizando a técnica de borbulhamento para monitorar trincas.

A figura abaixo exemplifica um vazamento de água que ocorreu devido a trincas no corpo da válvula. Primeiramente observou-se vazamento durante inspeção de rotina, na parada observou-se a falha.

Figura 14: Trincas no corpo da VAQ.



Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos).

Uma falha no sistema de refrigeração da VAQ causou o empenamento do disco e consequentemente sua interferência com a sede, como mostrada na figura abaixo.

Figura 15: Detalhe da interferência entre sede e disco.



Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos).

O desgaste do sistema de selagem devido a deficiências no sistema de lubrificação pode causar o vazamento externo de ar quente. Tal circunstância pode gerar uma parada emergencial ou necessidade de troca prematura da VAQ. Para evitar, deve-se inspecionar o sistema de lubrificação e elaborar procedimento de inspeção do conjunto de selagem.

A falha na montagem do selo e seu sistema (conjunto de gaxetas) pode gerar o vazamento de água pelas vedações da haste, disco ou sede para o interior do regenerador ou alto-forno com potencial instabilidade operacional. É sensato revisar procedimento de montagem das gaxetas para recuperação da VAQ.

A instalação incorreta do concreto refratário leva a sua queda e pode interferir no fechamento da válvula, causando desgaste indesejado e vazamento de água para interior do regenerador e/ou alto-forno causando instabilidade operacional. Ações como verificar procedimento de instalação do concreto refratário, verificar tipo de ancoragem para regiões críticas e qualidade do concreto seriam soluções para mitigar o problema.

As principais causas da válvula não abrir estão relacionadas à deficiência no sistema pneumático. Os modos de falha associados são atuação lenta, vazamento de ar

comprimido no sistema de acionamento e falha no sistema de controle. Tais situações ocasionam redução do volume de sopro devido à parada da sequência dos regeneradores ou até a parada do alto-forno. Outros modos de falha são vazamento de ar comprimido e válvula direcional do sistema pneumático travada, que podem ser causados por corrosão ou quebra da tubulação e corrosão ou degradação por acúmulo de pó/umidade, respectivamente. As ações recomendadas nestes casos são revisar procedimentos de operação do sistema de controle e elaborar plano de inspeção do sistema pneumático.

Observa-se que quando a falha funcional trata-se da não refrigeração dos internos da válvula nas condições requeridas, o problema pode estar associado ao fechamento indevido de válvula de bloqueio de fluxo por manobra inadequada em manutenções, possibilitando danos às partes refrigeradas e parada do alto-forno. É indicado a capacitação constante de operadores e criar monitoramento eficaz da vazão da água de refrigeração. A queima do motor elétrico de refrigeração devido condições de operação não ideais leva à necessidade de partir a bomba reserva. Torna-se, portanto, importante revisar procedimentos de inspeção dos motores elétricos – cuidados quanto à limpeza, presença de umidade e verificar necessidade de isolamento.

A não refrigeração dos internos pode ainda levar à parada de alto-forno devido ao vazamento de água no mangote e sistema de alimentação elétrica em falha. É conveniente inspecionar e elaborar plano de manutenção para o sistema de refrigeração, além de revisar procedimentos de inspeção do sistema elétrico.

É prudente verificar se há prolongamento de vida útil, para detectar um possível desgaste dos elementos da válvula que propicia folgas excessivas. Para prevenir paradas do alto-forno e eventual troca da VAQ, é necessário monitorar os componentes em cobre e estabelecer plano de troca considerando tempo de uso.

A indisponibilidade dos geradores de emergência causa a falha deste sistema. Portanto, é coerente realizar simulações e revisar os procedimentos de teste para prevenir falhas ocultas e consequentes danos às partes refrigeradas de todas as válvulas.

Observa-se que os modos de falha de maior risco na FMEA são “Sistema de alimentação elétrica em falha - sistema de emergência entra em operação” e “Queda do revestimento refratário”. Este fato é decorrente dos altos índices de severidade, ocorrência e detectabilidade. No primeiro caso, apesar da baixa probabilidade de acontecer, os outros dois parâmetros elevam a taxa de risco. Já o segundo, apesar de não haver disparidade entre os fatores, todos são relativamente altos (maiores que 5) resultando o alto RPN.

6. CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado, fica clara a importância, já esperada, da VAQ no processo de produção do gusa. É inevitável ressaltar que o mau funcionamento da válvula traz graves efeitos como parada da sequência dos regeneradores bem como a parada do alto-forno. Problemas como estes causam enormes transtornos na empresa como perda de produção, danos ao meio ambiente e riscos à vida humana. Outro fator extremamente afetado é o custo que a empresa despende com manutenção, compra de novos equipamentos, sobressalentes e recursos humanos, além do lucro cessante.

O método de análise da MCC indica o melhor tipo de manutenção a ser aplicada. A manutenção detectiva é preconizada para sistemas de emergência que, quando acionados, podem revelar uma falha oculta. Em momentos de extrema necessidade, a operação deve poder contar com o bom funcionamento do mesmo para evitar maiores danos.

Com o modelo da FMEA que foi utilizado, foi possível atender as necessidades da indústria. Desse modo, podem-se visualizar os efeitos que a falha irá causar de forma macro, prática e direta, pois permite a correlação da falha com as funções que o equipamento desempenha.

Por fim, o estudo prevê que é possível que os níveis de segurança e confiabilidade do equipamento, mesmo com o envelhecimento, sejam alcançados e/ou recuperados e oferece alternativas de ações a serem implantadas com o menor

custo, a partir de dados recolhidos. Dessa forma, a MCC se mostra eficaz em cumprir seus objetivos.

7. REFERÊNCIAS

1. ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por ultrassom**. 101p. Apostila – Departamento de Soldagem, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2011.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
3. BARTHOLOMEU, Marcos. **O que é Manutenção Industrial**. Revista Agroanalysis. v.27, n.2, p.46, 2007.
4. CEPSTRUM. **Análise de óleo**. Disponível em: <<http://www.cepstrumsolucoes.com.br/site/analise-de-oleo/>>. Acesso em ago. 2016.
5. FOGLIATO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luiz Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
6. HENNER. **Estratégias de manutenção em projetos mecâtrônicos**. Disponível em: <<http://mecatronicaporhenner.blogspot.com.br/p/estrategias-de-manutencao-em-projetos.html>>. Acesso em jul. 2016.
7. INFRARED SERVICE. **Análise de Vibrações**. Disponível em: <<http://www.infraredservice.com.br/manutencao-preditiva/analise-de-vibracoes>>. Acesso em jul. 2016.
8. KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2009.
9. LAFRAIA, João Ricardo Barusso Lafraia. **Manual de Confiabilidade Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2001.
10. MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance - MCC**. 2. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1997.
11. MOURÃO, Marcelo Breda et al. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
12. SIQUEIRA, Iony Patriota. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2012.

13. SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. **Análise de vibração**. Disponível em: <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/energia_e_meio_ambiente/dafe/produtos/servicos/analise-de-vibracao>. Acesso em jul. 2016.
14. SURFACE VEHICLE/ AEROSPACE STANDARD – SAE International. **JA1011**: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (MCC) Processes. Nova York, 2009.
15. _____. **JA1012**: A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (MCC) Standard. Nova York, 2011.
16. VIANA, Hebert Ricardo Garcia. **Planejamento e Controle da Manutenção – PCM**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2002.

APÊNDICE A – Tabelas de classificação da O (Ocorrência), D (Detectabilidade), S (Severidade), φ (Velocidade de degradação).

Tabela 1: Tabela para classificação da severidade

ÍNDICE DE SEVERIDADE	NOTA
Falha de menor importância. Quase não são percebidos os efeitos.	1
Provoca redução gradual de performance do produto e surgimento gradual de ineficiência. Cliente perceberá a falha, mas não ficará insatisfeito com ela.	2 a 3
Produto sofrerá uma degradação progressiva. Cliente perceberá a falha e ficará insatisfeito.	4 a 6
Mais de 50 a 70% das vezes não se consegue manter a produção e se requer grande esforço do operador, há baixa eficiência e produtividade. Alta taxa de refugo. O produto não desempenha a sua função. O cliente perceberá e ficará muito insatisfeito.	7 a 8
Não se consegue produzir, (colapso) do processo. Problemas são catastróficos e podem ocasionar danos a bens ou pessoas. Cliente ficará muito insatisfeito.	9 a 10

Tabela 2: Tabela para classificação da ocorrência

ÍNDICE DE OCORRÊNCIA	NOTA
Muito remota - Excepcional	1
Muito pequena – Muito poucas vezes	2
Pequena – Poucas vezes	3
Moderada – Ocasional – Algumas vezes	4 a 6
Alta - Frequente	7 a 8
Muito alta – Inevitável – Certamente ocorrerá a falha	9 a 10

Tabela 3: Tabela para classificação da detectabilidade

ÍNDICE DE DETECTABILIDADE	NOTA
Muito alta probabilidade de detecção	1
Alta probabilidade de detecção. Em processo, ações corretivas são tomadas em pelo menos 90% das vezes em que seus parâmetros saem do controle.	2 a 3
Moderada probabilidade de detecção. Somente em 50% das vezes em que o processo sai de controle são tomadas ações corretivas	4 a 6
Pequena probabilidade de detecção. Nível de controle muito baixa. Até 90% das peças produzidas podem estar fora de especificação	7 a 8

Muito pequena probabilidade de detecção. Não há nenhum tipo de controle ou inspeção.	9
Muito remota probabilidade de detecção	10

Tabela 4: Tabela para classificação da velocidade de degradação

VELOCIDADE DE DEGRADAÇÃO	NOTA
Falha randômica	0
Defeito pode virar falha em menos de 30 dias	1
Defeito pode virar falha em mais de 30 dias	2

APÊNDICE B – FMEA da Válvula de Ar Quente

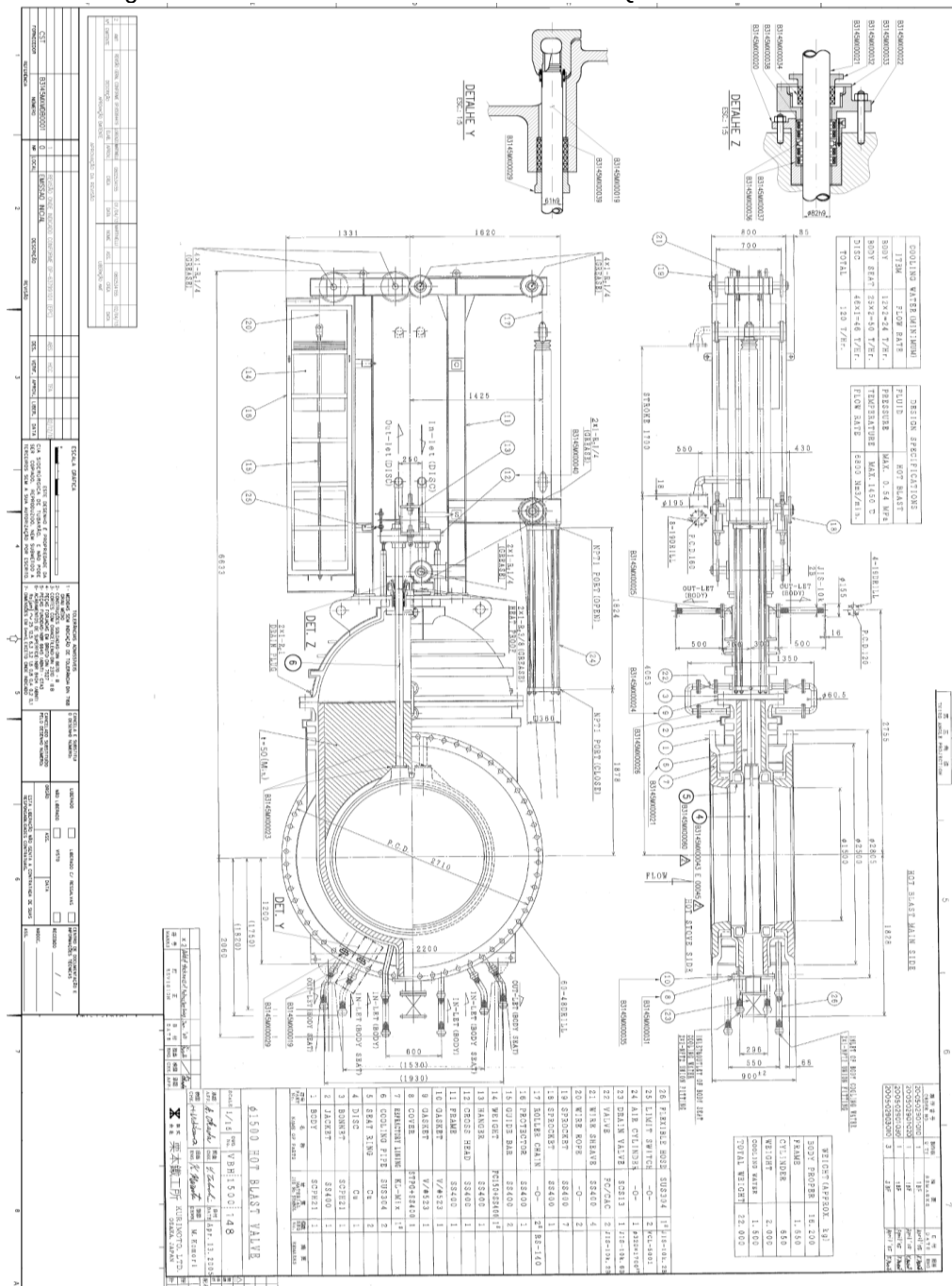
Figura 16: FMEA da Válvula de Ar Quente

NOME DO EQUIPAMENTO VÁLVULA DE AR QUENTE					ID / MODELO DO ITEM						
DEPARTAMENTO RESPONSÁVEL					COORDENADOR						
PARTICIPANTES BRENO ÁVILA, LAÍS PEDRONI					DATA						
					ESCOLHA DOS VALORES DE ACORDO COM A TABELA CLASSIFICATIVA					TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	
FUNÇÃO DO EQUIPAMENTO	FALHA FUNCIONAL EQUIPAMENTO	MODOS DE FALHA DO EQUIPAMENTO	CAUSAS	EFEITOS	Φ	S	O	D	RPN	MATRIZ DE DECISÃO	TAREFAS PROPOSTAS
ABRIR - ASSEGURAR O FLUXO DE AR QUENTE PARA O ALTO-FORNO	NÃO ABRIR (NÃO ASSEGURAR O FLUXO DE AR QUENTE PARA O ALTO-FORNO)	Vazamento de ar comprimido - sistema de acionamento (pistão pneumático)	Corrosão ou quebra de tubulação	Parada da sequência dos Regeneradores - potencial redução de volume de sopro e parada do Alto Forno	1	6	2	3	36	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Criar plano e procedimento de inspeção do sistema pneumático
		Válvula direcional do sistema pneumático travada	Corrosão ou degradação por acúmulo de pó / umidade	Parada da sequência dos Regeneradores - potencial redução de volume de sopro e parada do Alto Forno	2	6	3	2	36	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Criar plano e procedimento de inspeção do sistema pneumático
		Sistema de acionamento não recebe ar comprimido (pistão pneumático)	Falha no suprimento de ar comprimido da instalação / falha no sistema de controle (intertravamento)	Parada da sequência dos Regeneradores - potencial redução de volume de sopro e parada do Alto Forno	1	6	2	5	60	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Revisar procedimentos de operação do sistema de controle
		Agarramento mecânico disco / sedes	Empenamento das partes em cobre por deficiência de refrigeração	Parada do Alto Forno de 12 a 18h (troca do cabeçote da VAQ ou troca da VAQ completa)	1	9	4	3	108	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Criar plano e procedimento de inspeção do sistema de refrigeração
		Atuação lenta	Fugas no sistema pneumático (corrosão ou quebra de tubulação) / falha no suprimento de ar comprimido da instalação	Parada da sequência dos Regeneradores - potencial redução de volume de sopro e parada do Alto Forno	1	4	2	3	24	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Criar plano e procedimento de inspeção do sistema pneumático
FECHAR - ASSEGURAR O FLUXO DE AR QUENTE PARA O ALTO-FORNO NA SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO DE SOPRO COM OUTRO REGENERADOR	NÃO FECHAR (NÃO PERMITIR A SEQUÊNCIA DE SOPRO) *** considerar também os mesmos modos de falha para a função anterior (ABRIR) já analisados	Abertura / fechamento incompleto (válvula não movimentou o disco)	Interferência com corpo estranho no interior do duto (queda de tijolos refratários)	Potencial de danos ao disco possibilitando trincas e vazamentos de água. Possível parada emergencial ou necessidade de troca prematura da VAQ.	0	8	2	2	32	NENHUMA MANUTENÇÃO PROGRAMADA. REPROJEITO PODE SER DESEJADO	Reavaliação do projeto / instalação do revestimento refratário do duto e compensadores próximos à VAQ.
VEDAR DISCO / SEDE - ar quente de processo	NÃO VEDAR DISCO / SEDE	Desgaste das partes em cobre (sedes) - folga excessiva	Prolongamento excessivo de vida útil	Parada do Alto Forno de 12 a 18h (troca do cabeçote da VAQ ou troca da VAQ completa)	2	9	1	7	63	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Monitorar componentes em cobre (disco e sede) e estabelecer plano de troca considerando tempo de uso.
VEDAR HASTES	NÃO VEDAR HASTES	Desgaste do conjunto de selagem (gaxetas) com vazamento de ar quente para o exterior	Deficiência de lubrificação (VER SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO)	Possível parada emergencial ou necessidade de troca prematura da VAQ.	1	5	4	2	40	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Inspeccionar sistema de lubrificação / Elaborar plano e procedimento de inspeção do conjunto de selagem
REFRIGERAR O CORPO DA VÁLVULA - água (temp = 35°C ; vazão = 20th (corpo) / 35 th (sedes) / 30 th (disco) ; p=7 bar)	NÃO REFRIGERAR CORPO / DISCO / SEDES DA VÁLVULA NAS CONDIÇÕES REQUERIDAS	Vazamento de água no mangote	Mangotes de refrigeração com engate rápido (solto / em más condições)	Possibilidade de danos às partes refrigeradas: parada do Alto Forno de 12 a 18h	1	8	4	3	96	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Inspeccionar sistema de refrigeração / Elaborar plano de manutenção do sistema de refrigeração
		Fechamento indevido de válvula de bloqueio de fluxo	Operação indevida / manobra inadequada (em manutenções)	Possibilidade de danos às partes refrigeradas: parada do Alto Forno de 12 a 18h	0	8	3	5	120	NENHUMA MANUTENÇÃO PROGRAMADA. REPROJEITO PODE SER DESEJADO	Capacitação constante de operadores / criar alarme associado à medição de vazão da água de refrigeração.
		Motor elétrico da bomba de refrigeração queimado	Condições de operação do motor (umidade / contaminantes)	Necessidade de partir bomba reserva (stand by)	1	7	4	1	28	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Revisar procedimento de inspeção dos motores elétricos - cuidados quanto à limpeza e presença de umidade / Revisar plano de inspeção - medição de isolamento
		Sistema de alimentação elétrica em falha - sistema de emergência entra em operação	Condições de operação da sala elétrica (umidade / contaminantes)	Possibilidade de danos às partes refrigeradas de todas as válvulas. Parada por tempo indeterminado.	2	10	2	9	180	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Revisar procedimentos de inspeção do sistema elétrico
		Sistema de alimentação elétrica em falha - sistema de emergência não opera - Falha oculta	Indisponibilidade dos geradores de emergência	Possibilidade de danos às partes refrigeradas de todas as válvulas. Parada por tempo indeterminado.	0	10	1	9	90	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Manutenção detectiva: revisar procedimentos de testes do sistema de controle e sistema de emergência (teste - blackout)
MANter ESTANQUEIDADE DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO - DISCO / SEDE	NÃO MANter ESTANQUEIDADE DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO - DISCO / SEDE	Vazamento pelas vedações da haste (disco) ou sedes.	Falha de montagem do sistema de selagem (conjunto de gaxetas)	Vazamento de água para o interior do Regenerador e Alto Forno - potencial instabilidade operacional	1	8	5	3	120	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Revisar procedimento de montagem das gaxetas - detalhe do procedimento de fabricação / recuperação da VAQ
		Trincas nas partes em cobre (disco ou sedes)	Deficiência de refrigeração / interferência com corpo estranho no fechamento (tijolos refratários)	Vazamento de água para o interior do Regenerador e Alto Forno - potencial instabilidade operacional	1	8	5	3	120	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Criar plano de inspeção no sistema refrigeração - monitoração de presença de bolhas nos pontos de teste (tomadas)
MANter ESTANQUEIDADE DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO - CORPO	NÃO MANter ESTANQUEIDADE DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO - CORPO	Trincas na carcaça da válvula	Deficiência de refrigeração / falha no revestimento refratário	Vazamento de água para o interior do Regenerador e Alto Forno - potencial instabilidade operacional	1	8	5	3	120	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Criar plano de inspeção no sistema refrigeração - monitoração de presença de bolhas nos pontos de teste (tomadas)
PROTEGER A CARCAÇA DA VÁLVULA DO AR QUENTE DE PROCESSO	NÃO PROTEGER A CARCAÇA DA VÁLVULA DO AR QUENTE DE PROCESSO	Queda do revestimento refratário	Falhas na aplicação do concreto refratário / deficiências na fixação das âncoras / qualidade do concreto	Vazamento de água para o interior do Regenerador e Alto Forno - potencial instabilidade operacional	1	8	5	6	240	TAREFA SOB CONDIÇÃO PROGRAMADA	Verificar procedimento de instalação do concreto refratário / Avaliar tipo de ancoragem para regiões críticas (parte inferior da carcaça) / Verificar qualidade do concreto

Fonte: Elaborado pelos autores

ANEXO A – Desenho Técnico da Válvula de Ar Quente

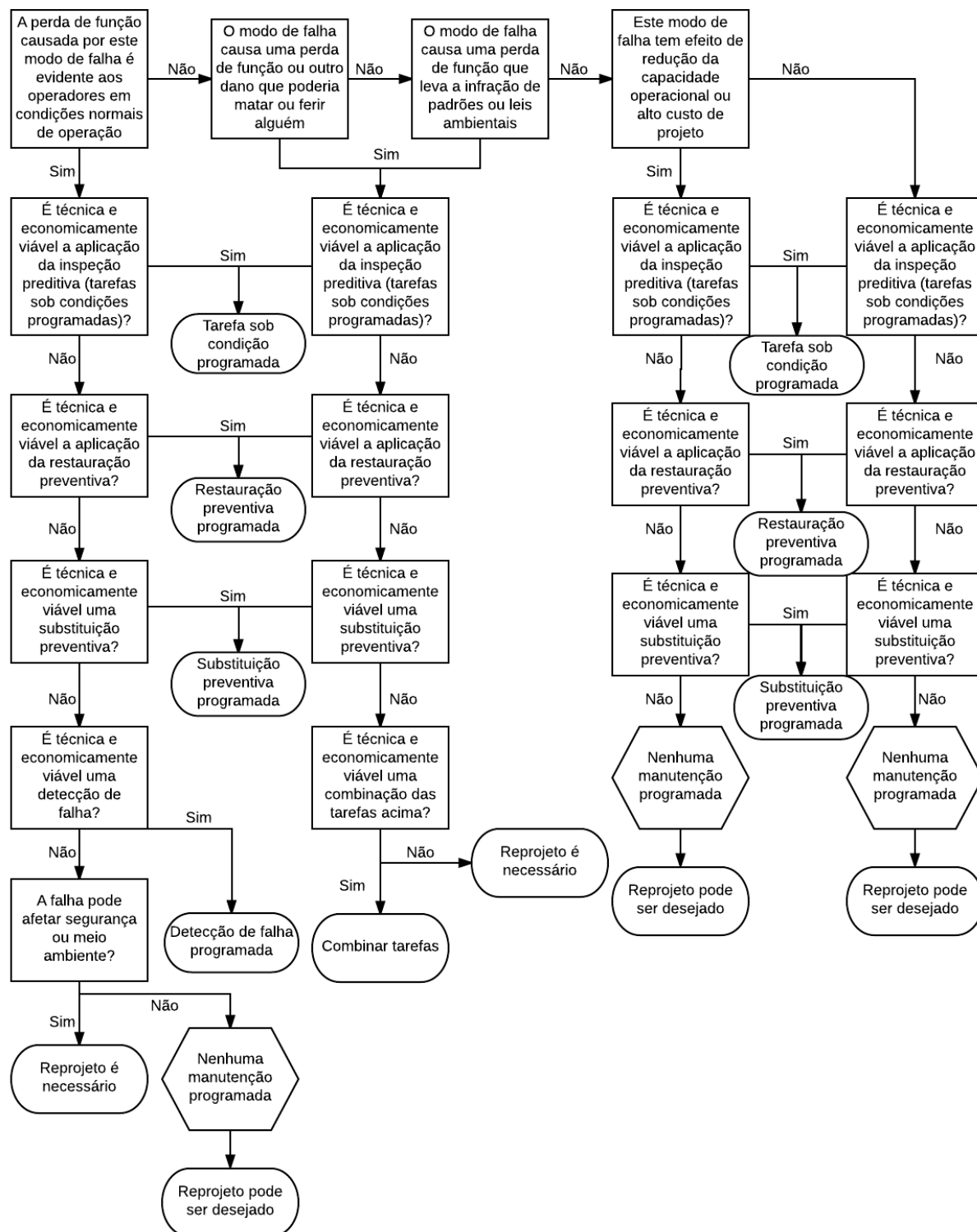
Figura 17: Desenho Técnico da Válvula de Ar Quente



Fonte: ArcelorMittal (Arquivos internos) (Adaptado).

ANEXO B – Matriz ou Diagrama De Decisão

Figura 18: Matriz de Decisão



Fonte: MOUBRAY (Adaptado), 2001, p. 197.