



APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE EM UM ALTO FORNO DE USINA SIDERÚRGICA

APPLICATION OF RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE IN A STEEL MILL

APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD EN UNA PLANTA SIDERÚRGICA

Filipe Carneiro Bastos¹ & Roberto Tetsuo Fujiyama^{2*}

^{1,2}Universidade Federal do Pará, Belém - PA

¹ filipecarneirobastos@gmail.com ^{2*} fujiyama.ufpa@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 30.05.2023

Aprovado: 03.07.2023

Disponibilizado: 06.09.2023

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção Centrada na Confiabilidade; Alto Forno; Usina Siderúrgica.

KEYWORDS: Reliability-Centered Maintenance; Blast Furnace; Steel Mill.

PALABRAS CLAVE: Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad; Alto Horno; Planta siderúrgica.

*Autor Correspondente: Fujiyama, R. T.

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico vem proporcionado inúmeras mudanças no processo industrial e têm levado à necessidade do aprimoramento da manutenção, em face da importância da disponibilidade operacional para o resultado das empresas. Neste estudo buscou-se aplicar a Manutenção Centrada na Confiabilidade nos equipamentos com elevados índices de criticidade de um alto forno de usina siderúrgica e apresentar os benefícios obtidos pós-aplicação. Como amostra inicial, foram utilizados os eletrosopraadores da sala de máquinas, devido ao elevado número de manutenções corretivas, além de longos tempos de paradas durante ocorrência de falha. Para aplicabilidade do método, as cinco etapas para implantação foram seguidas e, por fim, foi realizado comparativo entre os planos de manutenção antes e após a implantação da MCC e apresentado os ganhos obtidos através da redução do número de manutenções corretivas em determinado período de análise. A partir da aplicação da MCC nos equipamentos de criticidade A, conseguiu-se uma redução de 91,7% no número de manutenções corretivas no ano de 2022, ao comparar com 2021, além do aumento do MTBF e redução do MTTR para os equipamentos estudados.

ABSTRACT

The technological development has been causing several changes in the industrial process and has led to the need for maintenance improvement due to the importance of operational availability for companies' results. In this study, the goal was to apply Reliability Centered Maintenance (RCM) to the highly critical equipment of a

steel mill's blast furnace and to present the benefits obtained after implementation. As an initial sample, the motor starters in the engine room were used, given the high number of corrective maintenance actions and long downtimes during failure occurrences. For the method's applicability, the five implementation stages were followed, and finally, a comparison was made between the maintenance plans before and after RCMRCM implementation, presenting the gains achieved through a reduction in the number of corrective maintenance actions in a specific analysis period. By applying RCMRCM to the equipment with criticality A, there was a decrease in corrective maintenance actions in 2022 compared to 2021, as well as an increase in MTBF (Mean Time Between Failures) and a reduction in MTTR (Mean Time to Repair) for the studied equipment.

RESUMEN

El desarrollo tecnológico ha proporcionado innumerables cambios en el proceso industrial y ha llevado a la necesidad de mejorar el mantenimiento debido a la importancia de la disponibilidad operativa para los resultados de las empresas. En este estudio, se buscó aplicar el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) en los equipos con altos índices de criticidad de un alto horno en una planta siderúrgica y presentar los beneficios obtenidos después de la implementación. Como muestra inicial, se utilizaron los electrofiltros de la sala de máquinas debido al alto número de intervenciones de mantenimiento correctivo y largos tiempos de parada durante las fallas. Para aplicar el método, se siguieron las 5 etapas de implementación y, finalmente, se realizó una comparación entre los planes de mantenimiento antes y después de la implementación del MCC, presentando las mejoras logradas mediante la reducción del número de intervenciones de mantenimiento correctivo durante un período de análisis específico. A partir de la aplicación del MCC en los equipos de criticidad A, se logró una reducción del 91,7% en el número de intervenciones de mantenimiento correctivo en el año 2022, en comparación con el 2021, además del aumento en el MTBF y la reducción del MTTR para los equipos estudiados.



1. INTRODUÇÃO

Na gestão da manutenção a utilização de ferramentas estruturadas específicas pode proporcionar maior eficiência e disponibilidade do equipamento, menor custo de manutenibilidade, além de garantir maior segurança e qualidade do processo produtivo. Teles (2019) afirma que a Quarta Geração da Manutenção, nascida nos anos 2000 é marcada pela elevação da manutenibilidade dos ativos por parte dos fabricantes, pelos seus níveis de autonomia e pela adoção de estratégias de Manutenção de Classe Mundial.

Kardec e Nascif (2012) enfatizam que, com o aumento da competitividade entre empresas, criou-se maior necessidade de sistemas de manutenção mais confiáveis, que garantissem o funcionamento dos seus ativos.

O Reliability Centered Maintenance (RCM) ou Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é uma política de manutenção que seleciona e estrutura as atividades de manutenção necessárias para garantir a disponibilidade do ativo e, conseqüentemente, garantir a confiabilidade do processo produtivo. Lafraia (2014) apresenta que a MCC define o que deve ser feito para manter o ativo em plenas condições de funcionamento ao invés de deixá-lo em condições ideais.

O Alto Forno, setor essencial para o processo siderúrgico, necessita de ferramentas e estudos que possam atualizar, modernizar e expandir a atuação do setor da manutenção. A implantação da MCC irá contribuir positivamente, levando a estudos de falhas dos ativos, à revisão dos atuais planos de manutenção de forma a atuar para evitar falhas, com periodicidades das atividades relevantes para garantir o funcionamento do ativo.

Este trabalho tem como tema principal a aplicação da MCC em um alto forno de uma siderúrgica. Tal implantação irá garantir maior vida útil e disponibilidade dos equipamentos – sendo este o objetivo principal do trabalho –, por realizar estudo prévio, com etapas predefinidas e sequenciadas, objetivando levantar as principais falhas dos ativos e seus efeitos, através de um FMEA estruturado. Para isso, é necessária a revisão dos planos de manutenção com base nos dados obtidos das etapas anteriores, de forma a garantir maior vida útil e disponibilidade dos equipamentos e uma conseqüente confiabilidade do processo produtivo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manutenção Industrial

A manutenção industrial é uma prática antiga que remonta aos primórdios da civilização, com a conservação e reparo de equipamentos. A palavra “manutenção” teve origem no meio militar e significa “manter”, referindo-se à manutenção de mão de obra e provisões nas unidades de combate (Wyrebski, 1997).

A evolução da manutenção teve início durante a Segunda Guerra Mundial, quando as estratégias dessa eram voltadas principalmente para reparos após falhas (Mata Filho et al., 1998). No entanto, com o aumento da mecanização na indústria após a guerra, a manutenção tornou-se uma função essencial e uma forma de vantagem competitiva



(Fernández & Márquez, 2012). De acordo com a ABNT NBR 5462 (1994), a manutenção envolve todas as medidas técnicas e administrativas destinadas a manter ou substituir um objeto, garantindo seu desempenho adequado. A manutenção abrange os conceitos de prevenção e correção.

As gerações da manutenção industrial representam diferentes fases de desenvolvimento. A primeira geração, que ocorreu entre os anos 1940 e 1950, era caracterizada por uma indústria pouco mecanizada, equipamentos simples e manutenção basicamente corretiva não planejada (Kardec & Nascif, 2012; Siqueira, 2005). Já a segunda geração, ocorrida entre os anos 1960 e 1970, trouxe a adoção da manutenção preventiva baseada no tempo, devido à mecanização crescente e à busca por maior produtividade (Kardec & Nascif, 2012; Lucatelli, 1998).

A terceira geração, entre os anos 1970 e 1990, foi impulsionada pelas demandas do mercado, com foco em confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e meio ambiente (Lucatelli, 2002; Siqueira, 2005). A quarta e última geração, entre os anos 2000 e 2005, enfatizou técnicas de manutenção preditiva, monitoramento de condições e projetos voltados à confiabilidade e disponibilidade (Rosa, 2016; Dunn, 1998). Essas diferentes gerações representam a evolução da manutenção industrial ao longo do tempo, refletindo as necessidades e exigências das indústrias em cada época.

2.2 Tipos de falhas

Uma das principais funções da manutenção é prevenir e reparar falhas. Para isso, elas devem ser devidamente categorizadas, analisadas e catalogadas. Em outras palavras, precisamos entender como o sistema falha. Para aplicação da MCC, as falhas se classificam de acordo com o efeito que provocam sobre uma função do sistema a que pertencem.

Siqueira (2005) divide as falhas em dois grandes grupos: falha funcional, como sendo a incapacidade de um ativo de desempenhar a função; e falha potencial, como sendo uma condição identificável para posterior ocorrência de uma falha funcional.

A falha potencial é apresentada por Teles (2019) como o momento em que ela se inicia no ativo, não comprometendo por completo o equipamento, mas diminuindo a sua *performance*. Já a falha funcional é vista como a incapacidade de funcionar no nível de desempenho que foi especificado como satisfatório.

Na Figura 1 é representado um esquema dos tipos de falhas e alguns exemplos do cotidiano.



Figura 1. Tipos de falhas, conceitos e exemplos



Fonte: Autores (2023).

2.3 Tipos de Manutenção

A ABNT NBR 5462 (1994) apresenta as manutenções corretivas, preventivas e preditiva como os três principais tipos de manutenção. Dentro de cada tipo derivam-se outras categorias.

2.3.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é a mais antiga e mais utilizada pelas empresas, independentemente do seu nível de planejamento de manutenção. Caracteriza-se essencialmente por ações reativas, ou seja, curativas, não planejadas ou emergenciais necessárias para restaurar (Smith, 1993).

Segundo a Norma NBR 5462, a manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma falha (ou pane), e atua após a ocorrência de uma falha funcional, onde o equipamento já deixou de desempenhar sua função (ABNT NBR 5462, 1994).

2.3.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é realizada em intervalos predeterminados e tem como objetivo reduzir a probabilidade de falhas ou degradação do funcionamento de um item (ABNT NBR5462, 1994). Embora tenha um custo menor em comparação com a manutenção corretiva, ainda é considerada relativamente cara em relação a outros tipos de manutenção (Kardec & Nascif, 2009).

No estabelecimento dos intervalos de tempo para a manutenção preventiva, é comum adotar uma abordagem conservadora, resultando em intervalos mais curtos do que o necessário, o que pode levar a interrupções e substituições de peças desnecessárias (Xavier, 2010).

2.3.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva, também conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento, busca prever o estado futuro de um equipamento ou sistema por meio da análise de dados coletados ao longo do tempo (Teles,



2019). Essa abordagem visa detectar irregularidades, quantificar a origem e gravidade dos defeitos e estabelecer limites para programação e execução de reparos, com o objetivo de corrigir falhas potenciais antes de causarem danos irreversíveis (Nepomuceno, 1989).

A manutenção preditiva apresenta benefícios significativos, como intervenção mínima no ativo e não exigência de parada do equipamento para sua realização, o que resulta em melhores resultados (Kardec & Nascif, 2009). Exemplos de técnicas utilizadas na manutenção preditiva incluem termografia, análise de vibração e análise de óleo.

2.4 Matriz de Criticidade

A matriz de criticidade é uma classificação importante para o desenvolvimento de políticas de manutenção adequadas, avaliando a criticidade das máquinas em termos do impacto das falhas no processo produtivo, segurança, qualidade, entre outros (Manutenção, 2016).

É uma metodologia que tem como finalidade a determinação da criticidade de um equipamento com base em critérios pré-estabelecidos. Também é responsável por ações de manutenção. Seis elementos, dentre eles segurança, qualidade e taxa de ocupação, são utilizados nesse algoritmo para definir qual caminho seguir. Cada resposta de um elemento é classificada em A, B ou C, onde essa classificação irá definir o caminho a ser seguido no algoritmo. A Tabela 1 apresenta as características utilizadas para classificação ABC.

Tabela 1. Tabela de matriz criticidade ABC.

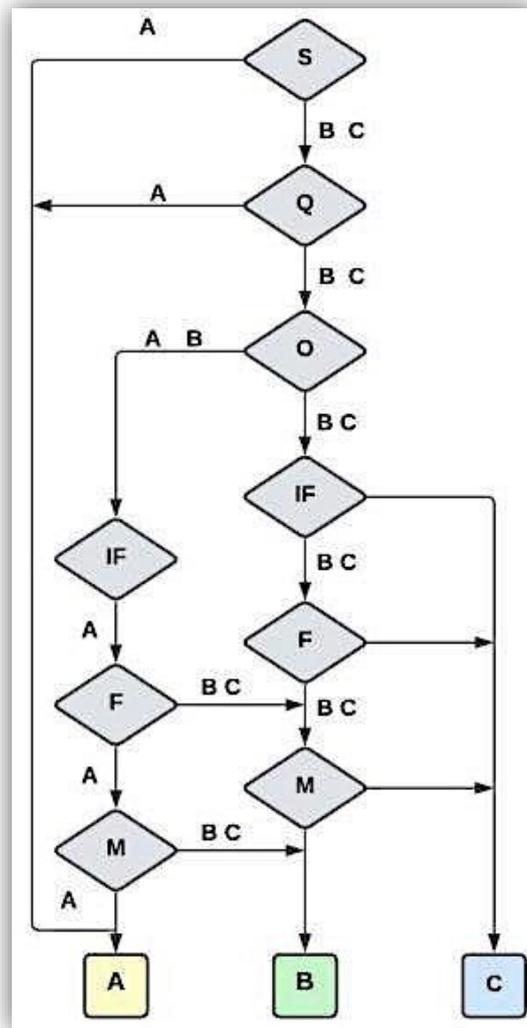
| | | CLASSE | | |
|----|--|--------------------------------------|--|-------------------------------|
| | | A | B | C |
| S | Risco potencial de um acidente quando ocorre uma falha | Risco Alto | Risco médio ou baixo | Risco descartado |
| Q | Risco de Perdas, reclamações, retrabalhos. | Risco alto para perdas e retrabalhos | Risco médio para perdas e retrabalhos | Risco baixo ou descartado |
| O | Tempo de operação do equipamento | 24h/dia | 8 a 24h/dia | < = 8h/dia |
| IF | Impacto no processo durante falha do equipamento | Interrompe todo processo de produção | Não interrompe processo, mas gera perdas | Não há impacto significativo |
| F | Frequência de falha do equipamento | Maior que 01 falha / 02 meses | 1 falha / 02 e 06 meses | Menor que 01 falha / 06 meses |
| M | Tempo médio de reparo (MTTR) | MTTR > 2h | 0,5h < MTTR < 2h | MTTR < 0,5h |

Fonte: Adaptado de JIPM (1995).

As informações da Tabela 2 devem ser analisadas e aplicadas junto ao fluxograma da Figura 2 para que seja definido qual o nível de criticidade do ativo.



Figura 2. Fluxograma da matriz criticidade ABC



Fonte: Adaptado de JIPM (1995).

2.5 Indicadores e métricas de confiabilidade

As medidas de confiabilidade de ativos, como o Mean Time Between Failures (MTBF) e o Mean Time to Repair (MTTR), são amplamente empregadas na avaliação da eficiência e confiabilidade de equipamentos e sistemas em diversos setores industriais.

De acordo com Pinheiro, Silva e Almeida (2016), o MTTR pode ser utilizado em conjunto com o MTBF para avaliar a confiabilidade em sistemas de produção. Essas medidas podem ser utilizadas para identificar possíveis falhas nos equipamentos e para melhorar a manutenção preventiva, contribuindo para a redução de custos e para a melhoria do desempenho dos ativos.

O cálculo do MTBF baseia-se no tempo médio de operação entre duas falhas consecutivas, considerando o tempo de reparo e manutenção preventiva. Dessa forma, é possível avaliar a confiabilidade dos equipamentos e programar ações de manutenção preventiva para evitar paradas não programadas. Já Cálculo do MTTR baseia-se no tempo médio de reparo entre as falhas ocorridas no equipamento.



Segundo Maiorky, Lima e Pereira (2015), a análise do MTTR pode ser realizada por meio do monitoramento do tempo de reparo de equipamentos. Além disso, a utilização do MTTR em conjunto com o Mean Time Between Failures (MTBF) pode contribuir para uma avaliação mais completa da confiabilidade dos equipamentos e sistemas industriais.

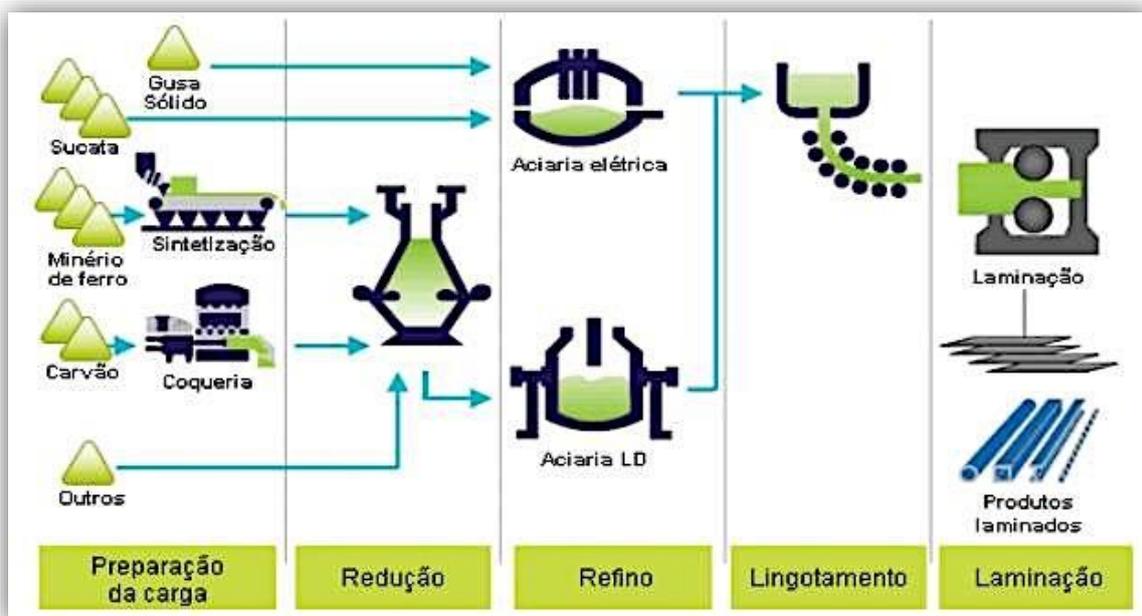
2.6 O Processo Siderúrgico

A evolução tecnológica da siderurgia no século XX cresceu bastante, visando aumento de produtividade, retorno de investimento e eficiência energética. O uso da sucata como matéria-prima para produção de aço é apontado como um ponto marcante da indústria siderúrgica atual, de acordo com o CGEE (2009). Brasil (2009) divide as usinas siderúrgicas em dois grupos: integradas e semi-integradas, sendo que as integradas produzem aço a partir de suas matérias-primas, enquanto as semi-integradas utilizam sucata como fonte de matéria-prima. Mourão (2007) apresenta as principais etapas que sucedem o processo de produção de aço em uma usina integrada, como:

- Etapa 1 - Obtenção do ferro gusa a partir das matérias-primas (produto intermediário);
- Etapa 2 - Conversão do ferro gusa em aço;
- Etapa 3 - Lingotamento do aço produzido;
- Etapa 4 - Conformação do aço em produto final (laminação).

Na Figura 3, são ilustradas as fases do processo produtivo de uma aciaria. A primeira fase de redução está presente nas usinas integradas, enquanto as usinas semi-integradas iniciam seus processos a partir da fase de refino. Um componente essencial nesse processo é o alto-forno, onde ocorrem processos complexos de transformação do minério de ferro em ferro-gusa líquido.

Figura 3. Etapas do processo siderúrgico



Fonte: <https://portalvirtuhab.paginas.ufsc.br/aco/>



2.7 O Alto-Forno

O alto-forno é um componente essencial na indústria siderúrgica, onde ocorrem processos complexos de transformação do minério de ferro em ferro-gusa líquido. Segundo especialistas, “O alto-forno é uma estrutura de grande porte e formato cilíndrico que permite a fusão e redução do minério de ferro, resultando na produção de ferro-gusa” (Geerdes, 2004).

O processo de produção no alto-forno envolve a carga de minério de ferro, coque e fundentes. Segundo pesquisadores: “O coque é utilizado como fonte de calor e carbono durante a reação de redução do minério de ferro. Já os fundentes, como calcário e dolomita, têm o papel de auxiliar na fusão dos componentes e na remoção de impurezas” (Mourão, 2007).

O ferro-gusa líquido, contendo carbono e outras impurezas, é coletado na parte inferior do alto-forno. Conforme apontado por pesquisadores: “Esse ferro-gusa líquido é posteriormente direcionado para outros processos na siderúrgica, como a aciaria, onde é transformado em aço por meio da remoção de impurezas e da adição de elementos de liga” (Geerdes, 2004).

2.8 Manutenção Centrada na Confiabilidade

A manutenção Centrada na Confiabilidade teve seus primeiros passos dados no início da década de 70, após um evento solicitado Federal Aviation Authority (FAA). Teles (2019) afirma que o principal motivo foi a necessidade de certificação da nova linha de aeronaves do Boeing 747 e necessitava de uma política de manutenção diferente das usuais devido ao nível de automação utilizado.

Moubray (1997) apresenta o conceito de MCC como um processo que determina o que deve ser feito para que um ativo continue a desempenhar sua função, dentro do seu contexto operacional. Afefy (2010) coloca que a MCC atua na otimização das estratégias de manutenção preventiva, garantindo maior confiabilidade dos equipamentos.

2.8.1 Etapas para Implantação

2.8.1.1 Requisitos Operacionais: Seleção do Sistema e Coleta de Informações

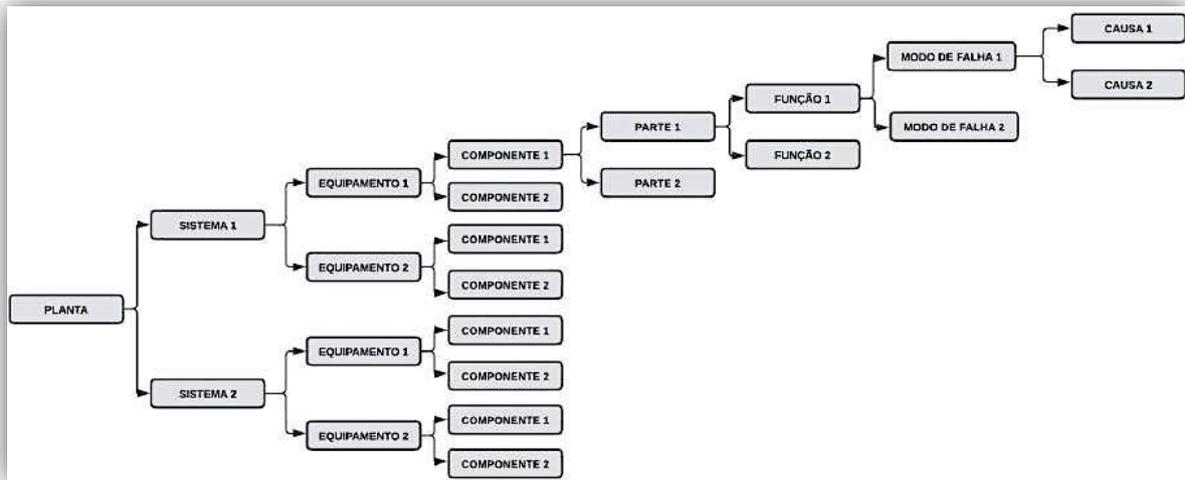
Será a etapa onde os requisitos operacionais e suas funções serão apresentados. Para realização desta etapa é necessário a consulta de algumas informações, tais como:

- Manuais dos fabricantes;
- Histórico de falhas dos equipamentos;
- Especificações de projeto.

Segundo Siqueira (2005), a primeira etapa do processo de implantação da MCC consiste em entender o funcionamento e a estrutura da instalação. Lafraia (2014) afirma que não há um nível de análise ideal predefinido e que a experiência da equipe de implantação e o monitoramento da eficácia da manutenção são fatores que determinam o nível de análise a ser realizado. Para determinar esse nível, é necessário criar diagramas de processo. Fogliatto e Ribeiro (2011) sugerem a integração de um banco de dados aos sistemas de MCC para registrar as falhas e as manutenções realizadas nos ativos. A Figura 4 apresenta um modelo de diagrama de processo utilizado na análise de MCC.



Figura 4. Modelo de Diagrama de Processo



Fonte: Adaptado de Lafraia (2014)

2.8.1.2 Análise Funcional do Sistema

Na etapa anterior do estudo de MCC foi criado o Diagrama de blocos, que permite identificar os ativos envolvidos no processo e suas interações. Agora, na segunda etapa, é possível identificar e definir as funções dos ativos e suas respectivas falhas funcionais, tendo como base os padrões de qualidade e segurança desejados. Segundo Moubray (1997), as funções podem ser classificadas em primárias e secundárias, sendo as primeiras as que justificaram a aquisição do ativo e as segundas as funções extras que ele pode executar. É importante que as funções sejam específicas ao contexto operacional para que se possa identificar as falhas funcionais e definir medidas para evitá-las. Lafraia (2014) destaca a importância de identificar as funções dos ativos e suas falhas para a correta aplicação da MCC.

2.8.1.3 Análise de Modos e Efeitos de Falhas

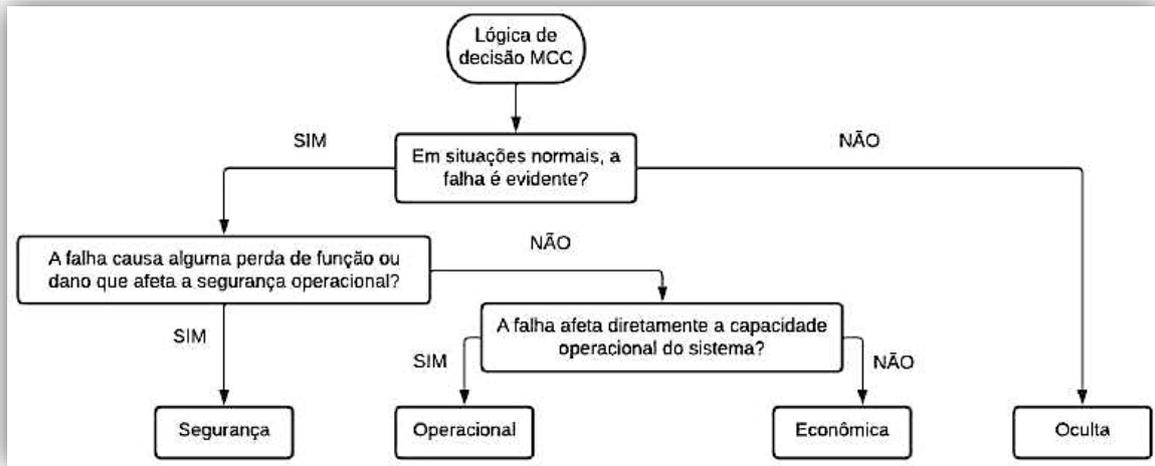
A terceira etapa para aplicação da MCC consiste na elaboração da Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), ferramenta que tem o objetivo de analisar possíveis falhas em processos industriais, identificando suas causas, efeitos e medidas para evitá-las. Com base nessa análise, é possível definir ações corretivas de acordo com a criticidade da falha. Segundo Kardec e Nascif (2012), a FMEA também pode ser utilizada como meio documentado de revisão de projetos e processos industriais, permitindo possíveis mudanças. Fazle (2018) destaca que a ferramenta requer a combinação do conhecimento técnico com a experiência humana para sua aplicação adequada.

2.8.1.4 Seleção das Tarefas e Tipos de Manutenção a Serem Aplicados

Após a realização do FMEA deverão ser definidas as tarefas de manutenção e os respectivos tipos de manutenção que essas se encaixam, e, posteriormente, serão incluídas aos planos de manutenção. Deshpande e Modak (2002) apresentam que o RCM enfatiza a forma como as funções podem falhar em algumas considerações baseadas em prioridade de segurança, economia e processo, que identifica tarefas de manutenção aplicáveis e eficazes. Para isso, utiliza-se o Diagrama de Blocos da MCC. Na Figura 4 esse modelo é apresentado.



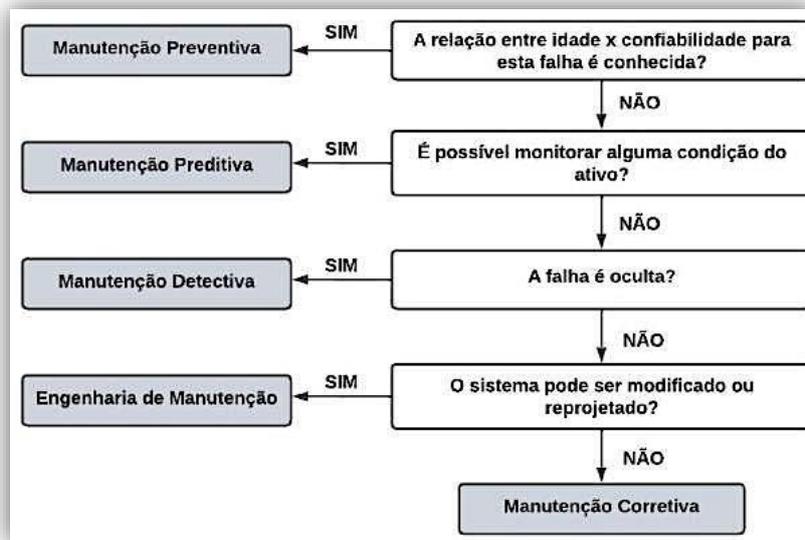
Figura 4. Diagrama de Blocos da MCC.



Fonte: Lafraia (2014).

Após o levantamento dos tipos de manutenção para cada falha, a atividade de manutenção pode ser elaborada e, posteriormente, acrescentada a um plano de manutenção. Em sua literatura, Kardec e Nascif (2009) também apresentam diagrama de decisão para os tipos de manutenção ideais a cada modo de falha, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5. Diagrama de decisão para tipos de manutenção



Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009)

2.6.1.5 Criação dos Planos de Manutenção

Um plano de manutenção eficaz deve incluir as tarefas a serem realizadas, os pontos críticos que devem ser monitorados, as responsabilidades e a frequência com que cada tarefa deve ser executada. De acordo com Teles (2019), existem duas formas possíveis de organizar um plano de manutenção: por criticidade ou por área. A frequência das atividades de manutenção deve ser determinada com base nas recomendações do fabricante e no desempenho dos ativos. Em alguns casos, pode ser necessário ajustar a frequência das atividades para evitar a ocorrência de falhas prematuras.



3. METODOLOGIA

Este estudo de caso investigou a aplicação do conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) nos equipamentos de um alto forno em uma usina siderúrgica. A escolha dessa área deveu-se aos elevados índices de manutenções corretivas e à facilidade de implementação inicial da MCC na usina em estudo, em comparação com outros setores da siderúrgica.

Inicialmente, realizou-se um levantamento de todas as informações necessárias para o início do trabalho, incluindo a árvore de ativos e suas principais funções, com o intuito de delimitar o escopo da pesquisa. Em seguida, foi elaborado um diagrama dividindo a área em subáreas, suas respectivas linhas de atuação e, por fim, as máquinas correspondentes a cada subárea.

Após essa etapa, procedeu-se à seleção dos equipamentos de maior criticidade (Classe A), utilizando-se uma matriz de criticidade de ativos. Os eletrosopradores da casa de máquinas foram escolhidos como amostra por apresentarem um alto índice de manutenções corretivas e por serem fundamentais para o processo do alto forno. Em seguida, foram analisadas as principais funções desses ativos, visando identificar suas principais falhas funcionais.

Para a análise detalhada das falhas realizou-se o estudo de Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), objetivando identificar os modos, causas e efeitos de falha de cada componente do ativo em estudo. Paralelamente, foi calculado o índice de Risk Priority Number (RPN), que classifica as falhas potenciais de acordo com seu nível de criticidade. Com base nos resultados do FMEA definiu-se um plano de manutenção, incluindo as tarefas adequadas para cada falha identificada, considerando a criticidade de cada tarefa específica, bem como informações do fabricante, local de instalação e experiências anteriores.

Após a implementação dos planos de manutenção, foram realizadas análises quantitativas do número de manutenções corretivas no primeiro trimestre de 2021 (antes da implantação da MCC) e em 2022 (após a implantação da MCC), a fim de avaliar os ganhos obtidos em termos de redução de ocorrências. Além disso, foram comparadas as métricas de confiabilidade (Tempo Médio Entre Falhas [MTBF] e Tempo Médio para Reparo [MTTR]) durante esses períodos, a fim de verificar os avanços relacionados aos tempos e quantidades de falhas dos ativos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Seleção dos Sistemas e Coletas de Informações

Os planos de manutenção analisados estão a nível de máquinas de ativos. Para selecionar os sistemas que participarão do estudo da MCC, inicialmente foi feito um levantamento nos ativos da planta, apresentando máquinas, suas respectivas linhas de produção e a subárea que está instalado, conforme o nível hierárquico de ativos apresentado por Teles (2019). A partir do levantamento dos ativos, foi realizado uma análise, com base na criticidade ABC de equipamentos. A Tabela 1 apresenta o levantamento dos 34 ativos da planta dos altos fornos e o nível de criticidade que cada um apresenta, tanto para o processo como para segurança e economia. Para o estudo de MCC serão considerados apenas os equipamentos de criticidade A apresentados na Tabela 2.



Tabela 2. Equipamentos de criticidade A dos Altos Fornos.

| Criticidade ABC das Máquinas | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|---|------------|-----------------------|---|
| Sub área | Linha | Máquina | Criticidade | | | | | | | | | | | | | | |
| Beneficiamento de minério | Lavagem de minério | TC Principal (Minério Bruto) | A | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Beneficiamento de carvão | Descarga de carvão | Tombador de carvão | A | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Área Alto Forno 1 | Sala de máquinas | Eletrosoprador 2 | A | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | Eletrosoprador 3 | A | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Eletrosoprador 4 | A | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | Eletrosoprador 5 | A | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | Eletrosoprador 6 | A | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | Alto Forno | Tremonha rotativa de distribuição de cargas | A | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | Plataforma | Granulador de escória | A |

Fonte: Autores (2022)

Inicialmente, a MCC será aplicada nos eletrosopradadores da sala de máquinas, devido ao seu maior índice de manutenções corretivas em relação aos demais equipamentos apresentados na Tabela 2. Posteriormente, os demais equipamentos de criticidade A serão inclusos a este estudo de MCC.

4.2 Análise de Funções e Falhas Funcionais

Para esta etapa foi preenchido uma planilha com as principais funções e falhas funcionais dos ativos de criticidade A da planta, obtidos na etapa anterior, conforme apresentado na Tabela 3, que evidencia as funções e falhas funcionais do motor e mancal monobloco, principais equipamentos do eletrosoprador. Apenas as falhas primárias foram levadas em consideração, por apresentarem influência mais significativa no processo. Lopes (2001) apresenta modelo de planilha similar ao apresentado na Tabela 3, informando o equipamento, funções e suas falhas funcionais.

Tabela 3. Análise de funções e falhas funcionais: Eletrosoprador.

| ANÁLISE DE FALHAS FUNCIONAIS - MCC | | |
|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Sub-área: Área do Alto Forno 01 | | Linha: Casa de Máquinas |
| Máquina: Eletrosoprador 02 | | |
| Equipamento | Função | Falha Funcional |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Fratura dos rolamentos LA e LNA |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Curto-circuito nas bobinas do estator |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Desarme do motor por sobrecorrente |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Desarme por superaquecimento |
| Mancal monobloco | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Fratura dos rolamentos LA e LNA |

Fonte: Autores (2022)



4.3 Aplicação da Análise Modos e Efeitos de Falha

A partir da aplicação do FMEA serão analisados os modos de falhas, suas causas e os efeitos que causam para cada falha funcional apresentada na etapa anterior. A partir dos dados coletados e analisados no FMEA, será possibilitada a elaboração das atividades dos planos de manutenção, realizadas em etapa posterior. A planilha FMEA utilizada neste trabalho é mostrada na Tabela 4, onde são apresentados os modos, causas e efeitos das falhas para o motor e mancal monobloco, possibilitando ser realizada uma avaliação de risco e calculado o seu índice Risk Priority Number (RPN), que aponta quais modos de falhas exigem mais prioridade e atenção para tratativas. Rosa (2016) de forma similar, aplica o FMEA e evidencia os modos de falhas com maiores RPN's para prioridades nas suas tratativas.

Tabela 4. Análise de funções e falhas funcionais: Eletrosoprador 02.

| PLANILHA FMEA | | | | | | | | | |
|------------------|---|--------------------------------|--|--|--|------------------------------|------------|---------|-----------------------------|
| Nº FMEA: 01 | | Data de elaboração: 29/05/2022 | | | | Responsável: Filipe Carneiro | | | |
| Área: AF1 | | Linha: Sala de máquinas | | | | Máquina: Eletrosoprador 02 | | | |
| Ponto de falha | | | Análise da falha | | | Avaliação de Risco | | | Ação Preventiva recomendada |
| Equipamento | Função do equipamento | Componente | Modos de falha (Sintoma) | Efeitos de falha | Causa da falha | Severidade | Ocorrência | Deteção | RPN |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamentos | Temperatura elevada | Fratura/Parada da máquina | *Quantidade de lubrificação inadequada; *Lubrificante inadequado; *Contaminação do lubrificante; *Montagem incorreta; *Carga excessiva | 6 | 7 | 6 | 252 |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamento | Vibração excessiva | Quebra do rolamento/Parada da máquina | *Lubrificação deficiente; *Excentricidade do rotor; *Desalinhamento do eixo de rotação; *Anéis com avarias; *Contaminação do lubrificante; | 7 | 7 | 8 | 392 |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Estator | Desbalanceamento de tensão | Curto circuito entre fases/Parada da máquina | Folga nas conexões da caixa de ligação. | 5 | 8 | 6 | 240 |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Estator | Temperatura elevada nas bobinas do estator | Curto circuito entre fases/Parada da máquina | Acúmulo de sujeira na carcaça do motor (aletas) | 8 | 6 | 6 | 288 |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Estator | Temperatura elevada nas bobinas do estator | Curto circuito entre fases/Parada da máquina | Ventilação forçada / Auto ventilação ineficiente | 6 | 5 | 8 | 240 |
| Mancal monobloco | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamento | Vibração excessiva | Quebra do rolamento/Parada da máquina | *Lubrificação deficiente; *Excentricidade do rotor; *Desalinhamento do eixo de rotação; *Anéis com avarias; *Contaminação do lubrificante; | 7 | 7 | 5 | 245 |
| Mancal monobloco | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamento | Temperatura elevada | Quebra do rolamento/Parada da máquina | *Quantidade de lubrificação inadequada; *Lubrificante inadequado; *Contaminação do lubrificante; *Montagem incorreta; *Carga excessiva | 8 | 6 | 5 | 240 |

Fonte: Autores (2022)



4.4 Seleção das Tarefas de Manutenção

Após a implementação do FMEA na etapa anterior, foi possível obter os dados de causas das falhas para cada modo delas, individualmente, e possibilitar a realização do levantamento das ações recomendadas para mitigação de cada falha. O fluxograma apresentado na Figura 5 foi utilizado para definir o tipo de manutenção a ser utilizado com base nos dados obtidos no FMEA. Na Tabela 5 é apresentada a planilha FMEA com as ações recomendadas preenchidas para cada modo de falha apresentado anteriormente, de acordo com cada equipamento.

Tabela 5. Planilha FMEA com ações preventivas recomendadas: Eletrosoprador 02.

| Planilha FMEA | | | | | | | | | | |
|------------------|---|--------------------------------|--|--|---|------------------------------|------------|---------|-----------------------------|--|
| Nº FMEA: 01 | | Data de elaboração: 29/05/2022 | | | | Responsável: Filipe Carneiro | | | | |
| Área: AF1 | | Linha: Sala de máquinas | | | | Máquina: Eletrosoprador 02 | | | | |
| Ponto de falha | | | Análise da falha | | | Avaliação de Risco | | | Ação Preventiva recomendada | |
| Equipamento | Função do equipamento | Componente | Modos de falha (SINTOMA) | Efeitos de falha | Causa da falha | Severidade | Ocorrência | Deteção | | RPN |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamentos | Temperatura elevada | Fratura/Parada da máquina | *Quantidade de lubrificação inadequada; *Lubrificante inadequado; *Contaminação do lubrificante; *Montagem incorreta; *Carga excessiva | 6 | 7 | 6 | 252 | Lubrificação periódica de acordo com especificações do fabricante; Acompanhamento periódico da temperatura de trabalho do componente. |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamento | Vibração excessiva | Quebra do rolamento/Parada da máquina | *Lubrificação deficiente; *Excentricidade do rotor; *Desalinhamento do eixo de rotação; * Anéis com avarias; *Contaminação do lubrificante; | 7 | 7 | 8 | 392 | Realizar análise de vibração periodicamente. Lubrificação periódica de acordo com especificações do fabricante |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Estator | Desbalanceamento de tensão | Curto circuito entre fases/Parada da máquina | Folga nas conexões da caixa de ligação. | 5 | 8 | 6 | 240 | Verificar aperto das conexões periodicamente |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Estator | Temperatura elevada nas bobinas do estator | Curto circuito entre fases/Parada da máquina | Acúmulo de sujeira na carcaça do motor (aletas) | 8 | 6 | 6 | 288 | Realizar limpeza na estrutura do motor. Realizar acompanhamento da temperatura de trabalho do equipamento. |
| Motor | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Estator | Temperatura elevada nas bobinas do estator | Curto circuito entre fases/Parada da máquina | Ventilação forçada/ Auto ventilação ineficiente | 6 | 5 | 8 | 240 | Verificar limpeza da tampa defletora do motor (motor Auto ventilado); realizar acompanhamento da temperatura de trabalho do equipamento. |
| Mancal monobloco | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamento | Vibração excessiva | Quebra do rolamento/Parada da máquina | *Lubrificação deficiente; *Excentricidade do rotor; *Desalinhamento do eixo de rotação; * Anéis com avarias; *Contaminação do lubrificante; | 7 | 7 | 5 | 245 | Realizar análise de vibração periodicamente. Lubrificação periódica de acordo com especificações do fabricante |
| Mancal monobloco | Rotacionar eixo do ventilador do eletrosoprador | Rolamento | Temperatura elevada | Quebra do rolamento/Parada da máquina | *Quantidade de lubrificação inadequada; *Lubrificante inadequado; *Contaminação do lubrificante; *Montagem incorreta; *Carga excessiva | 8 | 6 | 5 | 240 | Lubrificação periódica de acordo com especificações do fabricante; Acompanhamento periódico da temperatura de trabalho do componente. |

Fonte: Autores (2022)

4.5 Criação dos Planos de Manutenção

Esta etapa consistiu em montar o plano de manutenção, utilizando as ações recomendadas obtidas na etapa anterior. O Fluxograma proposto por Kardec e Nascif (2012) e apresentado anteriormente na Figura 5 foram utilizados para avaliar qual tipo de manutenção é mais adequado para cada modo de falha, individualmente. As tarefas de manutenção, apresentadas na etapa anterior, foram utilizadas para elaboração dos planos de



manutenção. A periodicidade dos planos foi embasada nas recomendações do fabricante e experiência em área, mas levando em consideração as características do local de instalação do ativo (sujidade, alta umidade, temperatura elevada). As periodicidades apresentadas nos planos de manutenção antes da aplicação da MCC também foram levadas em consideração para definição das periodicidades das atividades dos novos planos. A Tabela 6 apresenta o plano de manutenção revisado, com base na MCC, para os eletrosopradores da casa de máquinas.

Tabela 6. Plano de manutenção revisados com base na MCC.

| PLANO DE MANUTENÇÃO REVISADOS COM BASE NA MCC - ALTO FORNO 01 | | | | | | |
|---|------------------------------|--|---------------|------------------------------|---|--------|
| Código | Descrição | Atividade | Periodicidade | | | |
| INSP. SALA MÁQUINAS 00-08 | | Realizar limpeza na tampa defletora do motor | Semanal | | | |
| | | Realizar limpeza nas aletas dos motores | | | | |
| | | Verificar fixação da tampa defletora do motor | | | | |
| PRES/AF1-117 | COL. VIIB CASA MAQ 00-08 AF1 | Coletar vibração através do ponto de medição | Diário | | | |
| PRES/AF1-118 | COL. VIB CASA MAQ 08-16 AF1 | Coletar vibração através do ponto de medição | Diário | | | |
| PRES/AF1-119 | COL. VIB CASA MAQ 16-00 AF1 | Coletar vibração através do ponto de medição | Diário | | | |
| PRES/AF1-172 | LUB. MANCAIS CASA MAQ AF1 | MÁQUINA 02 - lubrificar rolamento lado acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | Semanal | | | |
| | | MÁQUINA 02 - lubrificar rolamento lado não acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 03 - lubrificar rolamento lado acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 03 - lubrificar rolamento lado não acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 04 - lubrificar rolamento lado acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 04 - lubrificar rolamento lado não acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 05 - lubrificar rolamento lado acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 05 - lubrificar rolamento lado não acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 06 - lubrificar rolamento lado acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | MÁQUINA 06 - lubrificar rolamento lado não acoplado do mancal com 46g de graxa diureia | | | | |
| | | PRES/AF1-111 | | COL. TEMP CASA MAQ 00-08 AF1 | Coletar temperatura através do ponto de medição | Diário |
| | | PRES/AF1-112 | | COL. TEMP CASA MAQ 08-16 AF1 | Coletar temperatura através do ponto de medição | Diário |
| PRES/AF1-113 | COL. TEMP CASA MAQ 16-00 AF1 | Coletar temperatura através do ponto de medição | Diário | | | |
| PRES/AF2-081 | LUB. MOTORES CASA MAQ AF1 | Lubrificar motor máquina 02 com 70g de graxa paracada ponto | Semanal | | | |
| | | Lubrificar motor máquina 03 com 70g de graxa paracada ponto | | | | |
| | | Lubrificar motor máquina 04 com 70g de graxa paracada ponto | | | | |
| | | Lubrificar motor máquina 05 com 70g de graxa paracada ponto | | | | |
| | | Lubrificar motor máquina 06 com 70g de graxa para cada ponto | | | | |
| | | Lubrificar motor máquina 06 com 70g de graxa para cada ponto | | | | |

Fonte: Autores (2022)

4.6 Comparativo Entre Planos de Manutenção

Após a conclusão da etapa 5, foi possível realizar um comparativo entre planos antes da aplicação da MCC e os que foram implementados com base na MCC. Foi retirado como amostra, o plano de manutenção preventivo para o eletrosoprador 2, da casa de máquinas. Na Tabela 7 é apresentado o plano de manutenção antes do estudo para implantação da MCC. Lopes (2001) também apresenta comparativo de planos de manutenção, antes (com a utilização do Sistema de operação e Manutenção [SOM]) e após a MCC, evidenciando também, as alterações realizadas nesses.



Tabela 7. Plano de manutenção antes da implantação da MCC.

| PLANO DE MANUTENÇÃO ANTES DA IMPLANTAÇÃO DA MCC - ALTO FORNO 01 | | | |
|---|---------------------------------------|--|---------------|
| Código | Descrição | Atividade | Periodicidade |
| LUBR/AF1-001 | LUBRIFICAÇÃO MOTORES CASA DE MÁQUINAS | LUBRFICAR MOTOR MAQ-02 24G PARA CADA PONTO | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MOTOR MAQ-03 24G PARA CADA PONTO | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MOTOR MAQ-04 24G PARA CADA PONTO | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MOTOR MAQ-05 24G PARA CADA PONTO | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MOTOR MAQ-06 24G PARA CADA PONTO | Quinzenal |
| LUBR/AF1-002 | LUBRIFICAÇÃO MANCAIS CASA DE MÁQUINAS | LUBRFICAR MANCAL MAQ-02 70g PARA 2 PONTOS | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MANCAL MAQ-03 70g PARA 2 PONTOS | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MANCAL MAQ-04 70g PARA 2 PONTOS | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MANCAL MAQ-05 70g PARA 2 PONTOS | Quinzenal |
| | | LUBRFICAR MANCAL MAQ-06 70g PARA 2 PONTOS | Quinzenal |
| PRES/AF1-007 | PRES. SIST. CASA DEMAQUINAS | VERIFICAR RUIDO ESTRANHO | Diário |
| | | VERIFICAR FIXAÇÃO DE ELEMENTOS | Diário |
| | | VERIFICAR VAZAMENTOS TUBULAÇÃO | Diário |
| | | VERIFICAR LUBRIFICAÇÃO DO DAPER | Diário |
| | | VERIFICAR TEMPERATURA LA/LNA MANCAL | Diário |
| PRES/AF1-008 | PRES. SIST. CASA DEMAQUINAS | VERIFICAR TEMPERATURA LA MOTOR | Diário |
| | | VERIFICAR RUIDO ESTRANHO | Semanal |
| | | VERIFICAR FIXAÇÃO DE ELEMENTOS | Semanal |
| | | VERIFICAR VAZAMENTOS TUBULAÇÃO | Semanal |
| | | VERIFICAR LUBRIFICAÇÃO DO DAPER | Semanal |
| VERIFICAR TEMPERATURA LA/LNA MANCAL | Semanal | | |
| VERIFICAR TEMPERATURA LA MOTOR | Semanal | | |

Fonte: Autores (2022)

Em análise aos planos da Tabela 7 (antes da implantação da MCC), algumas considerações foram levantadas:

- Ausência de planos preditivos de análise de vibração;
- Longa periodicidade de planos que incluem coleta de temperatura do motor e mancal monobloco de cada máquina;
- Ausência de as atividades de preservação dos motores (limpeza da tampa defletora e aletas), sendo fatores responsáveis por elevação de temperatura dos motores.
- A periodicidade dos planos de lubrificação dos motores e mancais monobloco era quinzenal, sendo considerada de longo período, devido às criticidades do local de instalação (temperatura elevada e sujeira);

Em comparativo com os planos antes e após a implementação do estudo da MCC, as seguintes considerações foram obtidas:

- Inclusão de planos preditivos de análise de vibração, com periodicidade a cada turno;
- Reduzido para cada turno a periodicidade dos planos de manutenção de temperatura do motor e mancal monobloco de cada máquina;
- Criado planos de manutenção que abordam atividades de preservação dos motores (limpeza da tampa defletora e aletas);
- As periodicidades dos planos de lubrificação dos motores e mancais monobloco foram reduzidas para semanais, devido à criticidade do local de instalação.

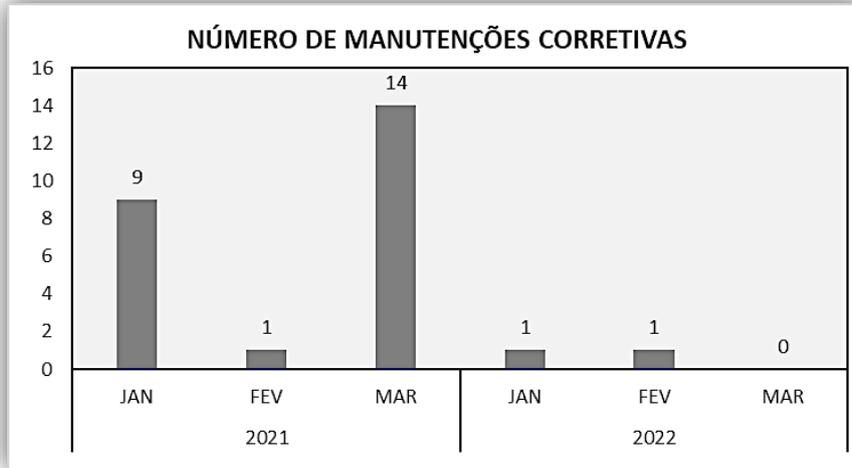
4.7 Resultados Alcançados

Quando ocorrem problemas relacionados às falhas funcionais nos equipamentos, são abertas notas de manutenção, caracterizadas como manutenções corretivas. Após a implantação dos planos com base na MCC, foi feito um comparativo do número de manutenções corretivas abertas via aplicativo ITSS para os eletrosopradadores da casa de



máquinas. Na Figura 10, foi feito um comparativo entre o primeiro trimestre de 2021 – que utilizava planos apenas com base em experiência técnica – e 2022 – onde os planos foram atualizados e revisados pela MCC.

Figura 5. Comparativo para número de manutenções corretivas



Fonte: Autor (2022)

Com os dados de manutenções, obtidos no SAP PM para os anos de 2022, também foram calculados os valores de MTBF e MTTR, sendo selecionados os valores de manutenções corretivas dos anos de 2021 e 2022, conforme apresentado na Tabela 8. Rosa (2016) apresenta ganhos similares para o MTBF e MTTR após a implantação do MCC.

Tabela 8. Comparativo para número de manutenções corretivas

| Métricas de confiabilidade - Eletrosoprador 02 | | | |
|--|--------|------------------------|------|
| Valores Pré-MCC (2021) | | Valores Pós-MCC (2022) | |
| MTBF | 177,46 | MTBF | 301 |
| MTTR | 2,71 | MTTR | 2,27 |

Fonte: Autor (2022)

Em análise dos dados, observa-se uma redução de 91,7% para a relação do número de manutenções corretivas entre 2021 e 2022. Já para os índices de confiabilidade, houve um aumento de 69,6% em relação ao MTBF, o que garante maior disponibilidade do equipamento. Em contrapartida, o MTTR teve uma diminuição de 16,23% após a instalação da MCC, o que mostra a diminuição do tempo de reparo do equipamento.

5. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi aumentar a confiabilidade dos equipamentos dos altos fornos existentes em uma usina siderúrgica, aplicando a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) e abordando os seguintes passos: (i) Escolha e capacitação da equipe; (ii) seleção do sistema e coleta de informações; (iii) análise das funções e falhas funcionais; (iv) análise dos modos de falhas e seus efeitos; (v) determinação do plano de manutenção.

Os equipamentos do alto forno foram selecionados conforme o seu nível de criticidade, usando a matriz criticidade, com objetivo de particularizar os equipamentos classificados como nível A, para que inicialmente fosse aplicado a MCC. Entre os equipamentos de



criticidade A, foram selecionados os eletrosopradores como amostra inicial, devido ao seu alto índice de manutenções corretivas e longo tempo de parada do equipamento durante falhas.

Os resultados parciais obtidos pela aplicação da MCC nos equipamentos de criticidade A dos altos fornos, selecionados a partir da matriz de criticidade ABC, evidenciaram a importância de tal método, onde foi proporcionado uma maior compreensão do processo e funções de seus ativos, além de possibilitar a realização de uma avaliação mais detalhada a respeito das ações a serem implementadas para garantir a função de projeto dos seus principais ativos.

Após a aplicação da MCC para a máquina em estudo (eletrosoprador), foi obtido uma redução de aproximadamente 92% do número de manutenções corretivas, além da otimização das métricas de confiabilidade (MTBF e MTTR), conseguindo um aumento de 69,6% para o Tempo Médio entre Falhas (MTBF) e uma redução de 16,23% do Tempo Médio para Reparo (MTTR).

REFERÊNCIAS

- Afey, I. (2010). *Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study*. Engineering, 02. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.211109>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (1994). *Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia*, NBR 5462. Rio de Janeiro.
- Deshpande, V. S. & Modak, J. P. (2002). Application of RCM to a medium scale industry. *Reliability Engineering & System Safety*, 77(1), 31-43. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00011-X)
- Fazle, R. M. (2018). Assessment of fuzzy failure mode and effect analysis (FMEA) for reach stacker crane (RST): A case study. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 7(3), 336-348. <https://doi.org/10.22105/riej.2018.140970.1050>
- Fernández, J., & Márquez, A. (2012). *Maintenance Management in Network Utilities: Framework and Practical Implementation*. London: Springer. https://www.researchgate.net/publication/314041265_Maintenance_Management_in_Network_Utilities
- Fogliatto, F. S. & Ribeiro, J. L. (2011). *Confiabilidade e manutenção industrial* [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: Elsevier ABEPRO.
- Geerdes, M., Vliet C., Toxopeus H., & Medeiros F. (2004). *Práticas modernas para operação de altos-fornos*. [S. l.: s. n.]. 128p.
- Kardec, A. & Nascif, J. (2009). *Manutenção: Função Estratégica* (3a ed.). Rio de Janeiro: Qualitymark Editora.
- Kardec, A. & Nascif, J. (2012). *Manutenção: Função Estratégica* (4a ed.). Rio de Janeiro: Qualitymark Editora.
- LaFraia, J. R. B. (2014). *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Rio de Janeiro, RJ: Editora Qualitymark.
- Manutenção. (2016). *Manutenção em Foco. Classificação ABC de Máquinas e Equipamentos*. Recuperado de <https://www.manutencaoemfoco.com.br/classificacao-abc/>
- Siqueira, I. (2005). *Manutenção centrada na confiabilidade: Manual de implementação*. Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Smith, A. M. (1993). *Reliability-Centered Maintenance*. USA: McGraw-Hill, Inc.
- Teles, J. (2019). *Bíblia do RCM – O guia completo e definitivo da Manutenção Centrada na Confiabilidade da era de indústria 4.0*. Brasília: Engeteles.
- Vidal, R., Guay, M., Tremblay, P., Dion, J., & Gagné, M. (2019). *A study of the performance of the furnace lining in an iron-making blast furnace*. *Journal of Iron and Steel Research, International*.
- Wyrebski, J. (1997). *Manutenção Produtiva Total - Um modelo adaptado*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/158161>
- Xavier, J. (2010). *Indicadores de Manutenção*. Recuperado de http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/MAN/indicadores_manutencao.pdf

