UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROPOSTA DE UM MODELO INTEGRADO PARA MELHORIA DA DISPONIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

THIAGO MUNA OLINTO

RIO GRANDE, RS
2020

THIAGO MUNA OLINTO

PROPOSTA DE UM MODELO INTEGRADO PARA MELHORIA DA DISPONIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica" – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Leonardo de Carvalho Gomes

RIO GRANDE, RS

2020

Ficha Catalográfica

O46p Olinto, Thiago Muna.
Proposta de um modelo integrado para melhoria da disponibilidade dos equipamentos na gestão da manutenção / Thiago Muna Olinto. – 2020.
92 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2020.
Orientador: Dr. Leonardo de Carvalho Gomes.

1. *Jack-knife Diagram* (JKD) 2. Gestão da Manutenção 3. Tempo Médio de Restabelecimento (MTTR) 4. Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) I. Gomes, Leonardo de Carvalho II. Título.

CDU 621

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

Ata n° **13/2020** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e sete dias do mês de novembro de dois mil e vinte, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas, via Videoconferência, a que se submeteu o mestrando **THIAGO MUNA OLINTO,** nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa simulação e processos de fabricação, com o seguinte título: **PROPOSTA DE UM MODELO INTEGRADO PARA MELHORIA DA DISPONIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO.**

Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl e Flávio Sanson Fogliatto e presidência do Professor Leonardo de Carvalho Gomes. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Leonardo de Carvalho Gomes: APROVADO
2. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
3. Flávio Sanson Fogliatto: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____
CPF: 885669350-04

2. _____
CPF: 575195100-00

3. _____
CPF: 424992080-15

THIAGO MUNA OLINTO: _____

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Marcos e Mírian, por sempre acreditarem em mim e por terem me proporcionado a melhor educação possível.

À minha amada esposa Myrian e a minha filha Mariana, por todo amor e incentivo nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Myrian Olinto, pelo apoio incondicional e pelo incentivo dado à realização deste trabalho.

Aos meus pais pela educação e valores transmitidos no decorrer do meu desenvolvimento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo de Carvalho Gomes pelo apoio em todos os momentos do estudo que iniciou ainda na graduação.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

À Universidade Federal do Rio Grande – FURG, por possibilitar um ensino gratuito e de qualidade.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, pela oportunidade em desenvolver o meu estudo.

Aos professores da banca avaliadora, Prof. Dr. Flávio Sanson Fogliatto que foi uma das principais referências utilizadas no estudo e ao Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, também coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, pelo incentivo e oportunidade em realizar o mestrado acadêmico, além do meu orientador.

RESUMO

Baseado na evolução da manutenção das últimas décadas, onde o setor passou a ter uma função estratégica mais relevante para o negócio, o presente trabalho busca responder ao *gap* identificado no mercado: como os indicadores de desempenho utilizados na gestão da manutenção poderiam ser avaliados e gerenciados de forma integrada para uma melhor tomada de decisão? Dessa forma, o objetivo principal do trabalho é propor um modelo integrado para aumento da disponibilidade dos equipamentos na gestão da manutenção, validando o modelo com uma aplicação em uma empresa de fertilizantes. O método utilizado para o trabalho é a pesquisa ação, fazendo uso das abordagens quantitativas e qualitativas. O modelo proposto é baseado na análise estatística da confiabilidade em conjunto com o diagrama *Jack-knife* (JKD), utilizando os indicadores Tempo Médio de Restabelecimento (MTTR) e Tempo Médio entre Falhas (MTBF) de forma combinada. Após a identificação do equipamento com o pior desempenho para a unidade produtiva, o modelo integrado propõe dois caminhos a serem seguidos, um buscando a melhoria do MTBF e o outro do MTTR. A tomada de decisão de qual caminho seguir é embasada na localização do equipamento no diagrama *Jack-knife*, não sendo excluída a possibilidade de implementação de ambos os caminhos. A definição do indicador a ser melhorado é importante para o setor da manutenção, pois permite a melhor alocação dos recursos. Com a implementação do modelo, observou-se uma redução de 20% do MTTR do equipamento, passando de 2,25h para 1,8h. Essa redução de 0,45h no valor médio, representa ao ano um ganho de 12h de unidade disponível para operação, possibilitando um aumento de volume de aproximadamente 1.100 toneladas. Paralelamente a isso, com a redução do MTTR do equipamento, a equipe de manutenção também terá essas mesmas horas no ano para execução de outras atividades de manutenção. Por outro lado, a melhoria no MTBF não foi observada, devido a uma falha na execução do FMEA, onde o principal modo de falha do ano de 2019 não foi contemplado no estudo. Ao simular o indicador, expurgando os eventos de falha não contemplados no FMEA, a melhoria do MTBF seria de 21%. Com isso, o modelo integrado é validado, tendo como premissa a correta aplicação das ferramentas propostas.

Palavras-chave: *Jack-knife Diagram* (JKD); Gestão da Manutenção; Tempo Médio de Restabelecimento (MTTR); Tempo Médio Entre Falhas (MTBF).

ABSTRACT

Based on the maintenance evolution in the last decades, where the maintenance sector started to have a more relevant strategic function for the business, the present work seeks to answer the *gap* identified in the market: how could the performance indicators used in maintenance management be assessed and managed in an integrated way for better decision making? Therefore, the work has as main objective to propose an integrated model to increase the equipment availability in maintenance management, validating the model with an application in a fertilizer company. The method used for the work is action research, making use of quantitative and qualitative approaches. The proposed model is based on the reliability analysis, using the Jack-knife diagram (JKD) to identify the worst performing equipment, using the indicators Mean Time to Repair (MTTR) and Mean Time Between Failures (MTBF) in a combined way. After identifying the equipment with the worst performance for the production unit, the integrated model proposes two paths to be followed, one seeking to improve MTBF and the other MTTR. The decision of which path to follow is based on the location of the equipment in the Jack-knife diagram, not excluding the possibility of implementing both paths. The definition of the indicator to be improved is important for the maintenance sector, as it allows for a better allocation of resources. With the implementation of the model, a reduction of 20% in the MTTR of the equipment was observed, going from 2.25h to 1.8h. This reduction of 0.45h in the average value, represents a gain in a year of 12h of production unit available for operation, allowing a volume increase of approximately 1,100 tons. At the same time, with the reduction of the equipment's MTTR, the maintenance team will also have these same hours in the year to perform other maintenance activities. On the other hand, the improvement in MTBF was not observed, due to a failure in the execution of the FMEA, where the main failure mode of the year 2019 was not considered in the study. When simulating the indicator, excluding the failure events not covered in the FMEA, the MTBF improvement would be 21%. So, the integrated model is validated, with the premise of the correct application of the proposed tools.

Keywords: Jack-knife Diagram (JKD); Maintenance Management, Maintenance Value Stream Mapping (M-VSM); Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Histograma de Pareto para a falha no rolamento utilizando como critério a duração das causas dos eventos. 19
Figura 2 - Histograma de Pareto para a falha no rolamento utilizando como critério o custo das causas dos eventos. 20
Figura 3 - *Jack-knife Diagram.* 21
Figura 4 - *Jack-knife Diagram* com alteração nos quadrantes devido mudança no cenário do mercado, sendo o custo de planta parada mais significativo que o custo de manutenção. 22
Figura 5 - *Jack-knife Diagram* com alteração nos quadrantes devido mudança no cenário do mercado, sendo o custo de manutenção mais significativo. 23
Figura 6 - Fluxograma das etapas macro da pesquisa. 27
Figura 7 - Etapas Planejadas. 27
Figura 8 - Modelo teórico proposto. 31
Figura 9 - *Jack-knife Diagram* ilustrando o impacto na confiabilidade. 35
Figura 10 - *Jack-knife Diagram* ilustrando o impacto na mantenabilidade. 36
Figura 11 - *Jack-knife Diagram* ilustrando o impacto na disponibilidade. 37
Figura 12 - Relações funcionais de Mudge 38
Figura 13 - Resumo da avaliação de criticidade. 39
Figura 14 - Etapas do M-VSM. 45
Figura 15 - Curva de confiabilidade dos dados da planta de granulação através do software Proconf. 47
Figura 16 - Curva da taxa de falha da planta de granulação realizada através do software Proconf. 49
Figura 17 - *Jack-knife Diagram* dos equipamentos com os piores valores de MTBF. 52
Figura 18 - Relações funcionais de Mudge para o granulador rotativo. 53
Figura 19 - Resumo da criticidade do granulador rotativo. 54
Figura 20 - Plano de inspeção sensitiva de planta parada. 58
Figura 21 - Plano de manutenção preditiva mecânica de planta parada. 58
Figura 22 - Plano de manutenção preventiva mecânica de planta parada. 59
Figura 23 - Plano de manutenção preditiva elétrica de planta parada. 59
Figura 24 - Plano de manutenção preventiva elétrica planta parada. 59
Figura 25 - Continuação do plano de manutenção preventiva elétrica de planta parada. 60

Figura 26 - Mapa do estado atual das atividades corretivas no granulador rotativo. 62
Figura 27 - Mapa do estado futuro das atividades corretivas no granulador rotativo. 63
Figura 28 - Quadro de ferramentas e bancada de trabalho para manutenção no granulador rotativo. 64
Figura 29 - Inventário de materiais de pequeno porte para manutenção no granulador rotativo. 65
Figura 30 - Inventário de materiais de grande porte para manutenção no granulador rotativo. 65
Figura 31 - Sistema de controle de ferramentas. 65
Figura 32 - Distribuição Bibliográfica por Estrato. 78
Figura 33 - Distribuição dos Artigos por Qualis 79
Figura 34 - Distribuição dos Artigos por Data 79
Figura 35 - Peso de cada categoria para avaliação da criticidade. 83
Figura 36 - FMEA do granulador rotativo. 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de falha do rolamento. 20
Tabela 2 - Dados de confiabilidade da planta de granulação para cada período de tempo 47
Tabela 3 - Top 10 dos piores equipamentos em termos de MTBF 50
Tabela 4 - N° de eventos, duração e MTTR do top 10 dos piores equipamentos em termos de MTBF. 51
Tabela 5 - Comparativo entre o MTTR e MTBF antes e depois da implementação das ações do estudo. 66
Tabela 6 - Comparativo entre o MTTR e MTBF antes e depois da implementação das ações do estudo – expurgando os eventos do material utilizado fora da especificação. 67
Tabela 7 - Lista completa dos equipamentos da planta de granulação com seus respectivos valores de MTBF e distribuição. 81

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Objetivos gerais 15
1.2 Objetivos específicos 15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16
2.1 Comparação entre o Histograma de Pareto e o *Jack-knife Diagram* (JKD) como métodos complementares na análise estatística da confiabilidade 18
2.2 Mapeamento do Fluxo de Valor na Manutenção (M-VSM) 23
3 METODOLOGIA 25
3.1 Caracterização da pesquisa 25
3.2 Etapas da pesquisa 27
4 RESULTADOS 29
4.1 Desenvolvimento do modelo téorico 29
4.1.1 Análise estatística da confiabilidade da unidade produtiva e classificação dos 10 equipamentos com os menores valores de MTBF 33
4.1.2 Elaboração do *Jack-knife Diagram* (JKD) e identificação do equipamento com o pior desempenho 34
4.1.3 Análise da criticidade do equipamento 37
4.1.4 FMEA do equipamento 39
4.1.5 Definição da estratégia de manutenção para o equipamento 43
4.1.6 Aplicação do M-VSM para o mapeamento da atividade de manutenção do equipamento e aplicação das ferramentas do *Lean* para eliminação dos desperdícios 44
4.1.7 Avaliação da eficácia do modelo integrado 46
4.2 Aplicação do modelo integrado na unidade de granulação 46
4.2.1 Análise estatística da confiabilidade da planta de granulação e classificação dos 10 equipamentos com os menores valores de MTBF 46
4.2.2 Elaboração do *Jack-knife Diagram (JKD)* e identificação do equipamento com o pior desempenho 50
4.2.3 Análise de criticidade do equipamento 53
4.2.4 FMEA do equipamento 54
4.2.5 Definição da estratégia de manutenção 57
4.2.6 Aplicação do M-VSM para o mapeamento da atividade de manutenção do granulador rotativo e aplicação das ferramentas do *Lean* para eliminação dos desperdícios ... 60

4.2.7 Avaliação da eficácias das ações 66
5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS 68
6 CONCLUSÕES 72
7 REFERÊNCIAS 74
7.1 Referências nominais 74
7.2 Referências por estrato 78
7.3 Referências por qualis 79
7.4 Referências por data dos artigos 79
8 APÊNDICE 81

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica é algo que já acontece há muitos anos e a necessidade das empresas se adaptarem as transformações sempre existiu. Atualmente, podemos presenciar tecnologias em evidência como a inteligência artificial, tecnologia que vem desafiando cada vez mais as empresas e os grandes líderes. A construção de empresas inteligentes tornou-se algo de busca insaciável das grandes organizações, sendo que a maioria delas se encontra em processo de planejamento ou iniciaram projetos pilotos (MIT, 2020). Porém, algumas empresas ainda não estão preparadas, possuindo muitas oportunidades de organização em sua gestão (SANDERS; ELANGESWARAN; WULFSBERG, 2016). Neste cenário de oportunidades de gestão, os princípios do *Lean Manufacturing* surgem como uma poderosa ferramenta para as empresas. Os conceitos do *Lean* começaram a ser implementados antes dessas tecnologias, tornando-se atualmente quase que um requisito mínimo para a competividade das empresas (GOMES, MULLER, KLIEMANN NETO; 2001). A base dos conceitos do *Lean* são as pessoas, sendo a mudança no comportamento e na cultura o foco principal da metodologia (SEPPALA; KLEMOLA, 2004).

Mais especificamente, dentro dos elementos do *Lean Manufacturing* está a área de manutenção (DENNIS, 2008). O setor de manutenção era visto até as últimas décadas como um mal necessário pela gestão (MOSTAFA; DUMRAK; SOLTAN, 2015). Estudos de Pinjala, Pintelon e Vereecke (2006) mostram que os custos das atividades de manutenção variam de 15 a 70% do custo total de produção. Com isso, o processo de manutenção passou a ser visto também como um dos fatores responsáveis pela produtividade (FACCIO et al, 2014).

A gestão da manutenção é a responsável por monitorar a produtividade do setor, por meio da organização dos recursos humanos e materiais (DE ALMEIDA, 2018). Este monitoramento é realizado através dos indicadores de desempenho, dentro dos quais destacam-se: Disponibilidade, Tempo Médio de Restabelecimento (MTTR), Tempo Médio até a Falha (MTTF) e Tempo Médio entre Falhas (MTBF). Estes quatro indicadores podem ser utilizados para avaliação do desempenho do setor ou dos equipamentos individualmente. Organizações que possuem um sistema de manutenção bem estruturado, geralmente, fazem uso destes indicadores, pois são a

base do sistema de gestão da manutenção. Entretanto, são poucas as organizações que avaliam os indicadores de forma conjunta para as tomadas de decisão.

Assim, o *gap* identificado foi: como esses indicadores citados poderiam ser avaliados e gerenciados de forma integrada para uma melhor tomada de decisão na gestão da manutenção?

Um modelo integrado como suporte a gestão da manutenção, que avaliasse o MTBF, o MTTF e o MTTR de forma conjunta, direcionando as melhorias necessárias de acordo com o indicador que mais impacta à empresa, poderia ocasionar melhores disponibilidades e resultados para as unidades produtivas. Neste modelo integrado, a ideia inicial é que seja possível a identificação do indicador prioritário para os equipamentos a serem analisados, a fim de que seja direcionado o estudo. Pois, em algumas situações o equipamento pode apresentar baixa disponibilidade por estar com desempenho insatisfatório em relação a somente um dos indicadores (MTBF ou MTTR) ou em ambos, conforme mostra a equação 1 (SIFONTE; REYES-PICKNELL, 2017). Dessa forma, espera-se inicialmente que o método auxilie na tomada de decisão dos gestores.

$$\text{Disponibilidade} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad \text{(Equação 1)}$$

Portanto, o presente estudo propõe um modelo integrado para aumento da disponibilidade dos equipamentos, utilizando como base a análise estatística da confiabilidade e relacionando os indicadores citados, a fim de identificar o equipamento com o pior desempenho e atuar para melhoria dos indicadores. Por meio do aumento da disponibilidade dos equipamentos espera-se um aumento no volume de produção e, consequentemente, atingimento das metas estratégias da organização. Essa melhoria na disponibilidade é obtida com o modelo integrado por meio de dois vieses: ferramentas e conceitos do *Lean Manufacturing* e definição/revisão da estratégia de manutenção do ativo. Com a implementação de ambos os vieses, pretende-se reduzir os desperdícios ao longo da atividade de manutenção do equipamento, além de reduzir o número de eventos de falha, possibilitando assim um aumento na produtividade do setor e da organização.

A partir disso, além de propor o modelo integrado, o estudo busca a validação do modelo em uma indústria de fertilizantes, mais precisamente na unidade de

granulação. Esta unidade é responsável por produzir mais de 2.000 toneladas por dia de fertilizante, onde qualquer parada de produção tem impacto significativo nas margens de lucro. Logo, a confiabilidade dos equipamentos e a produtividade do setor de manutenção possuem papéis cruciais para o negócio. A busca pela validação do modelo integrado na prática se faz necessária visando a replicação futura do modelo em outros estudos.

Em relação a abrangência, o trabalho limitou-se a investigar os indicadores MTBF e MTTR, não sendo possível a determinação do MTTF por indisponibilidade de dados. Sendo assim, ao propor melhorias para aumento do MTBF e redução do MTTR, buscou-se esclarecer o impacto em cada um dos indicadores. Pois, conforme pode ser observado na Equação 2, o MTBF é calculado considerando o MTTR e o MTTF, ou seja, qualquer melhoria no MTTR do equipamento também impactará no MTBF, conforme estudos como o de Müller (2007).

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad \text{(Equação 2)}$$

O trabalho utilizou como método de pesquisa a pesquisa ação, pois além de buscar a solução de problemas concretos, o autor tem atitude participativa em relação ao objeto de estudo. Ademais, o presente estudo fez uso das abordagens quantitativas e qualitativas, sendo a abordagem quantitativa predominante na análise, a fim de permitir a melhor tomada de decisão dos gestores.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral do presente trabalho é propor um modelo integrado para melhoria da disponibilidade dos equipamentos na gestão da manutenção, relacionando os indicadores MTBF, MTTF e MTTR.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de atingir o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos precisam ser contemplados:

- Desenvolver teoricamente o modelo;

- Validar o modelo em um estudo de caso;
- Avaliar a eficácia do modelo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O setor da manutenção tornou-se uma área vital dentro das organizações em relação ao atingimento dos objetivos estratégicos (FRASER, 2014). Com isso, os objetivos principais do setor ao longo dos anos sofreram transformações, sendo atualmente fundamental buscar altas disponibilidades para os equipamentos, ocasionando o mínimo de paradas de produção, com o menor custo possível (KOMONEN, 2002). A perda de produção por uma falha não planejada em algum equipamento nunca será recuperada sem que custos adicionais sejam agregados (ALSYOUF, 2007).

O atingimento de tais objetivos pode ser alcançado através da utilização das melhores estratégias de manutenção. Atualmente diversas estratégias e ferramentas são conhecidas, entretanto elas precisam ser utilizadas de forma combinada (DEKKER, 1996). As antigas estratégias de manutenção corretiva e de manutenção preventiva (troca base tempo) não podem ser descartadas, entretanto atualmente já são conhecidas as suas limitações. Segundo estudos de Vishnu e Regikumar (2016), menos de 20% dos componentes falham dentro dos prazos prescritos. Logo, a adoção da estratégia de troca base tempo para todos os componentes, independentemente da criticidade, torna-se uma estratégia onerosa para a organização.

Dessa forma, a análise estatística da confiabilidade ganha peso dentro das organizações, pois ela permite a identificação das lacunas e, consequentemente, direciona as ações. Por meio da análise estatística da confiabilidade é possível analisar os equipamentos que mais afetam a empresa segundo algum critério, mas também é possível analisar os equipamentos individualmente, permitindo a adoção das melhores estratégias de manutenção.

Dentro da análise estatística da confiabilidade, alguns métodos auxiliares podem ser utilizados, entre eles o histograma de Pareto e o *Jack-knife diagram* (JKD). O histograma de Pareto é amplamente conhecido nas organizações, sendo utilizado em diversos setores e tipos de análises. Entretanto, o método JKD é mais adequado para este tipo de análise por se tratar de um método multivariado, permitindo

relacionar dois critérios distintos ao mesmo tempo, classificando os equipamentos em quadrantes e facilitando na tomada de decisão (KNIGHTS, 2004).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) por meio da NBR 5462 de Confiabilidade e Mantenabilidade apresenta algumas definições que são importantes para o desenvolvimento do presente trabalho, tais como: disponibilidade, mantenabilidade e confiabilidade. A disponibilidade é definida como a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado intervalo de tempo determinado, levando em consideração os aspectos combinados de sua confiabilidade, mantenabilidade e suporte de manutenção. Já a confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Fogliatto e Ribeiro (2011) explicam a confiabilidade no seu sentido mais amplo, associando à operação bem sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas. Por fim, o termo mantenabilidade é definido como a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas.

Além das ferramentas citadas anteriormente, a fim de auxiliar no desempenho da manutenção, os conceitos do *Lean Manufacturing* passaram a ser utilizados no setor, através da adoção dos seus princípios e ferramentas (MOSTAFA; DUMRAK; SOLTAN, 2015). Estudos de Smith (2004), definem o *Lean* na manutenção como sendo uma atividade proativa que faz uso de atividades planejadas e programadas, através dos conceitos e estratégias da Manutenção Produtiva Total (TPM), adoção da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) e empoderamento das pessoas.

As principais ferramentas do *Lean Manufacturing*, tais como Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM), 5S e gestão visual, são fundamentais para o sucesso da implementação do *Lean* na manutenção (SMITH; HAWKINS, 2004). Entretanto, antes de aplicar qualquer ferramenta é necessário que as pessoas da organização estudem e se comprometam com os conceitos básicos (TAPPING; SHUKET, 2018). Este comprometimento deve começar no nível mais alto da organização, sendo um dos focos da empresa, a fim de que seja obtida a sustentabilidade das ferramentas implementadas (SHOU et al; 2017).

O VSM é uma das ferramentas mais básicas do *Lean*, sendo responsável por mapear todo o fluxo de valor, possibilitando a identificação das atividades que agregam ou não valor. Por permitir o entendimento de todo o fluxo do material e da

informação, de forma integrada, o VSM geralmente é utilizado de forma preliminar a implementação do *Lean Manufacturing* (ROTHER; SHOOK, 2003). Pois, por meio do VSM é possível entender como um processo realmente performa, permitindo o desenvolvimento de um estado futuro mais eficiente (TORTORELLA et al., 2017).

2.1 COMPARAÇÃO ENTRE O HISTOGRAMA DE PARETO E O *JACK-KNIFE DIAGRAM* (JKD) COMO MÉTODOS COMPLEMENTARES NA ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CONFIABILIDADE

A avaliação de desempenho dos equipamentos é um processo fundamental dentro do setor da manutenção, pois é a partir dela que são direcionadas ações de melhoria. Através da análise é possível traçar uma estratégia para cada equipamento ou família de equipamentos, onde não se deve definir uma estratégia genérica para todos equipamentos, devido as particularidades e grau de importância dentro do processo produtivo que cada um apresenta. A fim de reduzir os custos com atividades desnecessárias, a seleção da estratégia apropriada é fundamental (SHAHIN et al., 2019).

Dentre os métodos utilizados para classificação e identificação dos equipamentos com baixo desempenho na manutenção, dois deles são objeto de análise neste capítulo: histograma de Pareto e *Jack-knife diagram* (JKD). A análise comparativa entre os métodos levou em conta a necessidade de definição dos equipamentos que apresentam pior desempenho, segundo alguns critérios definidos.

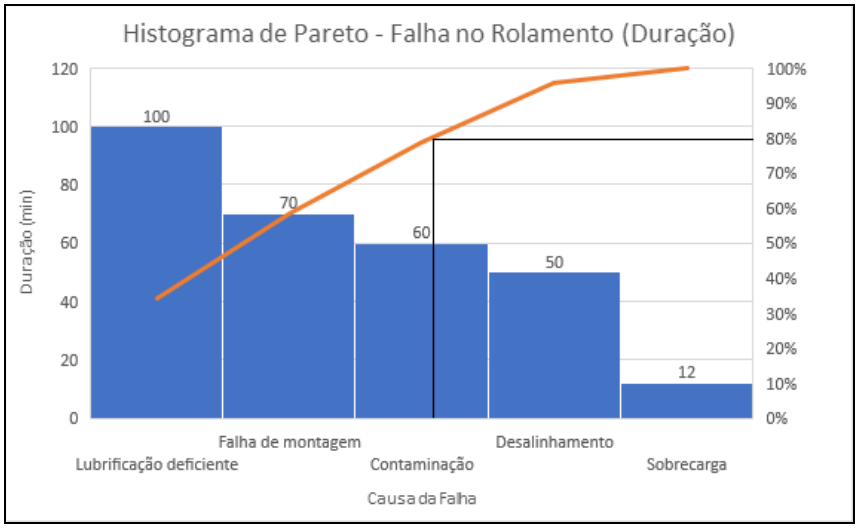
O histograma de Pareto, também conhecido como regra do 80/20, foi introduzido por Vilfredo Pareto para demonstrar que 80% da riqueza da Itália estava distribuída em 20% da população (CRAFT; LEAKE, 2002). O histograma de Pareto é uma técnica bastante conhecida e utilizada, não somente no setor de manutenção, mas também em outros setores e em empresas de diversos segmentos, devido a sua fácil aplicação. O histograma permite observar os itens que mais impactam em determinada análise segundo um único critério selecionado, sendo classificado como um método univariado.

Essa análise segundo um único critério é uma das desvantagens do histograma de Pareto em relação ao *Jack-knife diagram* quando aplicado em conjunto a análise estatística de confiabilidade. Pois, para poder analisar mais de um critério no

histograma, como por exemplo: frequência do *downtime*, MTTR e/ou custo, torna-se necessário a criação de um critério que relacione os demais, seja através do produto ou da razão entre eles. Sendo assim, dificultando a identificação dos principais fatores que causam o baixo desempenho dos equipamentos (KNIGHTS, 2004). A análise individual de cada critério através do histograma apresenta dificuldades de interrelação. Já o método JKD por se tratar de um método multivariado, possibilita a análise individual de dois fatores simultaneamente, possibilitando maior entendimento do peso de cada fator sobre o desempenho do equipamento (SEECHARAN, 2018).

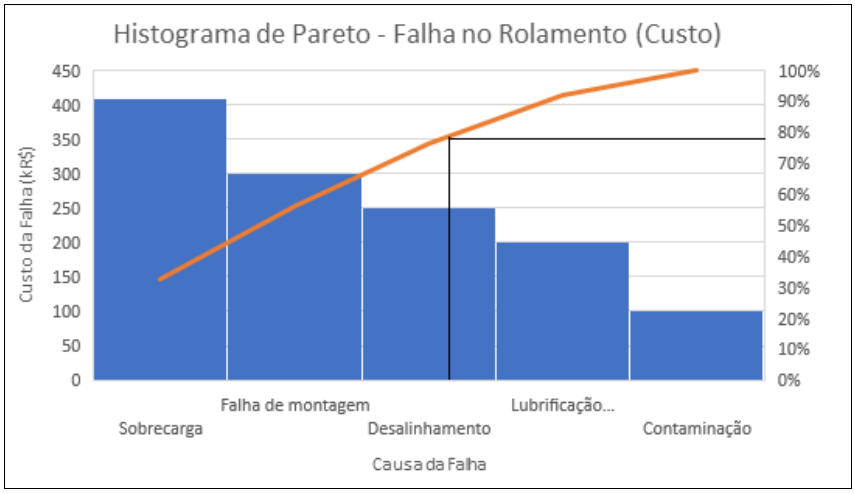
Nas figuras 1 e 2 são exemplificados histogramas de Pareto para falhas no rolamento de determinado equipamento. A figura 1 usa como critério a duração das causas dos eventos e a figura 2 usa o custo de cada causa das falhas, conforme os dados da tabela 1.

Figura 1 - Histograma de Pareto para a falha no rolamento utilizando como critério a duração das causas dos eventos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 2 - Histograma de Pareto para a falha no rolamento utilizando como critério o custo das causas dos eventos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Dados de falha do rolamento.

Código	Descrição	Eventos	Duração (min)	Custo (kR$)
1	Lubrificação Deficiente	20	100	200
2	Falha de Montagem	15	70	300
3	Contaminação	12	60	100
4	Desalinhamento	10	50	250
5	Sobrecarga	4	12	410
Total		61	292	1260

Fonte: Elaborado pelo autor.

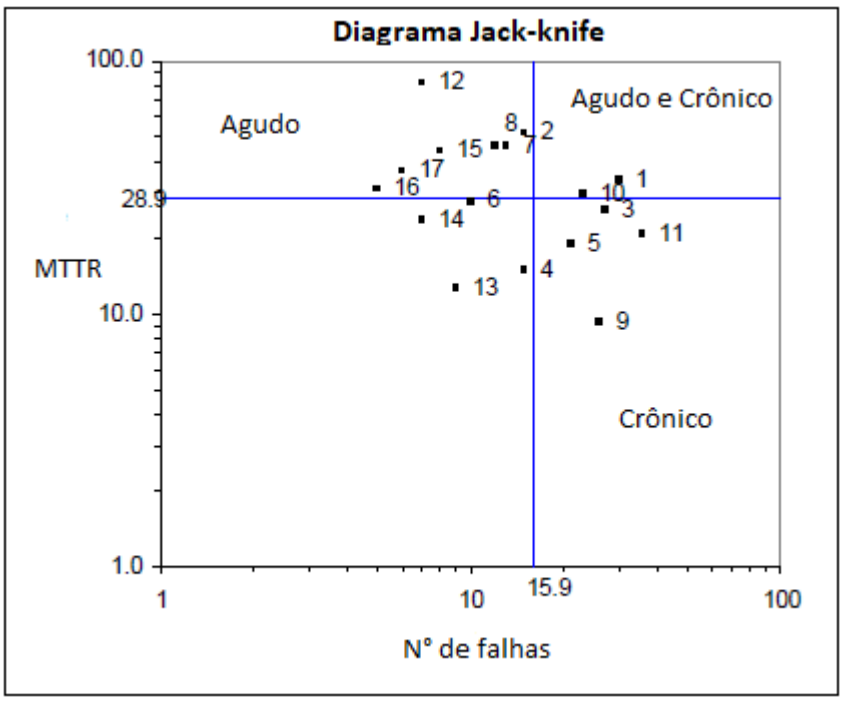
Através das figuras 1 e 2, observa-se a dificuldade citada anteriormente de relacionar a análise individual de dois fatores por meio do histograma de Pareto. No primeiro caso, se o critério selecionado fosse duração total das causas, o método indicaria para lubrificação deficiente, falha de montagem e contaminação. Quando o critério foi alterado para custo, o histograma aponta para sobrecarga, falha de montagem e desalinhamento. Sendo assim, para a utilização do histograma de Pareto, torna-se necessário a criação de um critério que englobe tanto a duração quanto o custo, o que torna a análise mais complexa.

Além disso, o histograma de Pareto pode causar problemas de interpretação em duas situações: quando houver somente um evento específico de um código de falha com altíssima duração e quando determinado código de falha apresenta diversos eventos, mas com o somatório de tempo muito baixo. No primeiro caso, o

evento pode ser uma anormalidade que não merece ser estudada, pois a causa pode já ser conhecida ou pois o evento foi uma exceção. Caso não seja realizada a correta interpretação dos dados pode-se priorizar um modo de falha equivocado. Já no segundo caso, o excesso de eventos de determinado modo de falha pode não ser priorizado segundo o histograma, entretanto ele pode ter um impacto considerável na confiabilidade de determinado equipamento (KNIGHTS, 2004).

Já o método JKD utiliza escala logarítmica para facilitar a visualização dos eventos e identificação dos equipamentos com pior performance, permitindo relacionar dois critérios simultaneamente. Dessa forma, o diagrama classifica os eventos ou equipamentos, dependendo do objeto de estudo, em: agudos/críticos, crônicos ou agudos/críticos e crônicos (KNIGHTS, 2004). A figura 3 mostra o diagrama *Jack-knife* e os seus quadrantes de classificação, sendo importante salientar que o primeiro quadrante, inferior à esquerda, não possui classificação, pois os equipamentos localizados nesse quadrante apresentam baixo MTTR e número de eventos, não devendo ser priorizados para análise.

Figura 3 - *Jack-knife Diagram.*

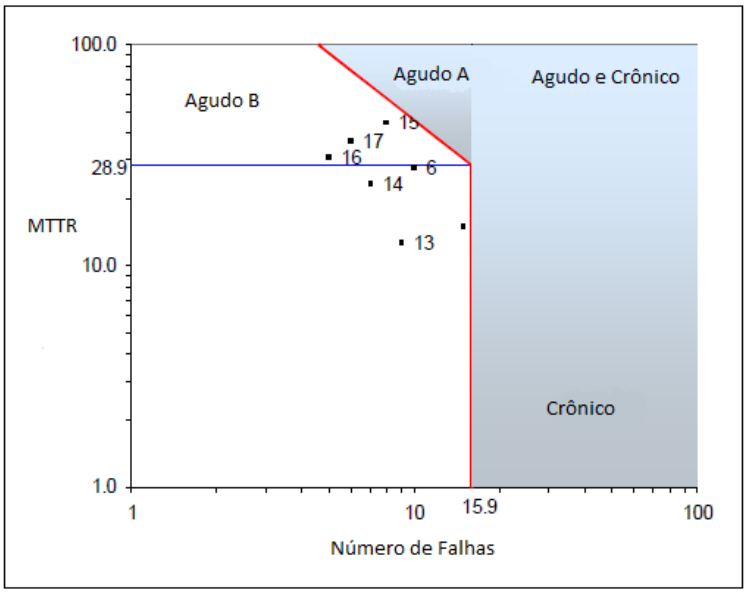


Fonte: Knights, 2004.

Ademais, o diagrama crítico crônico, como também é chamado o JKD, pode alterar os quadrantes de acordo com o mercado ou período de safra, por exemplo.

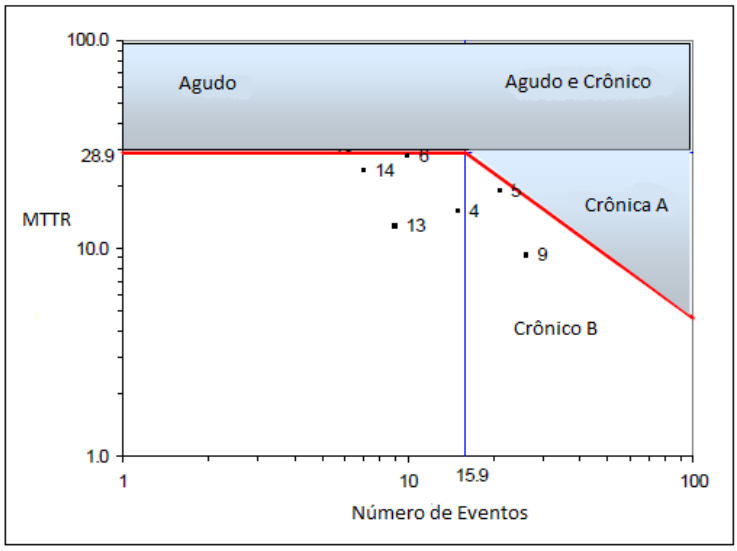
Em momentos onde o custo de ter a planta parada é muito mais representativo do que o custo com a manutenção, deve-se priorizar por uma alta disponibilidade e confiabilidade, dessa forma, os limites dos quadrantes sofrem alteração conforme mostra a figura 4. Já em situações que o preço do produto está baixo e os custos de produção ficam mais consideráveis, o custo de manutenção torna-se mais significativo, alternando novamente o limite dos quadrantes, conforme a figura 5 (KNIGHTS, 2004).

Figura 4 - *Jack-knife Diagram* com alteração nos quadrantes devido mudança no cenário do mercado, sendo o custo de planta parada mais significativo que o custo de manutenção.



Fonte: Knights, 2004.

Figura 5 - *Jack-knife Diagram* com alteração nos quadrantes devido mudança no cenário do mercado, sendo o custo de manutenção mais significativo.



Fonte: Knights, 2004.

2.2 MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR NA MANUTENÇÃO (M-VSM)

O VSM foi criado para mapear o fluxo de valor do produto, entretanto a metodologia teve sua utilização expandida para diversas áreas (DAL FORNO et at, 2014). O setor da manutenção é uma das áreas que passou a adotar a ferramenta, visando reduzir o MTTR dos equipamentos, reduzir o tempo de fabricação de um item e otimizar o fluxo de controle dos equipamentos reservas (PINTO, 2013).

A expansão do VSM foi possível devido ao conceito abrangente da ferramenta, que visa identificar e eliminar os desperdícios ao longo do fluxo do material e da informação, e devido a sua simplicidade de aplicação. Segundo Nash e Poling (2011), o VSM é um método simples e visual que permite as partes envolvidas documentarem, visualizarem e compreenderem o fluxo. Os autores Rother e Shook (2003) e Chowdary e George (2012) sugerem que o VSM é uma ferramenta simples de papel e caneta que pode ser finalizada em um curto período. Entretanto, Rother e Shook (2003) reforçam que apesar de sua simplicidade, a ferramenta precisa ser implementada no “chão da fábrica”, observando atentamente o processo e envolvendo as partes interessadas.

A implementação do VSM é dividida em quatro etapas, segundo Rother e Shook (2003):

- Seleção da família do produto a ser mapeado no fluxo de valor;
- Elaboração do estado atual do fluxo de valor;
- Elaboração do estado futuro do fluxo de valor;
- Elaboração e implementação do plano de ação.

Uma vez implementadas as ações, o estado atual e o estado futuro precisam ser redesenhados e um novo plano de ação elaborado, a fim de manter o ciclo de melhoria contínua (ROTHER, SHOOK; 2003).

As ações implementadas no VSM para transformação do estado atual em estado futuro devem ser suportadas por diferentes ferramentas e conceitos do *Lean*. Além disso, os autores Abdulmalek e Rajgopal (2007) e Shou et al (2017) sugerem que após a implementação do estado futuro, outras ferramentas mais avançadas serão necessárias para seguir o processo de eliminação dos desperdícios.

A utilização do VSM em outras áreas trouxe a necessidade de novos indicadores para medir a eficácia da implementação da metodologia. Os autores Sawhney, Kannan e Li (2009) sugerem em seu trabalho, onde foi aplicado o VSM na manutenção (M-VSM), a utilização do indicador *Lead Time* Médio de Manutenção (MMLT – Mean Maintenance Lead Time). Este indicador mede o tempo necessário para o equipamento voltar a produzir em sua capacidade nominal a partir da comunicação da falha.

$$MMLT = MTTO + MTTR + MTTY \quad \text{(Equação 3)}$$

O MTTO é o tempo médio para organização (Mean Time to Organize), medido pelo tempo necessário para a equipe de manutenção organizar as documentações e materiais, além de se descolocar até a atividade. O MTTR é o tempo médio para restabelecimento (Mean Time to Repair), onde é considerado somente o tempo necessário para a correção do problema. Por fim, o MTTY que é o tempo médio para produção (Mean Time to Yield), ou seja, é o tempo necessário para o equipamento voltar a produzir na nominal após a intervenção (SAWHNEY, KANNAN, LI; 2009).

O indicador proposto por Sawhney, Kannan e Li (2009), quando comparado aos conceitos de Womack e Jones (2003) a respeito de valor agregado, mostra que somente a parcela do MTTR no indicador MMLT é onde a manutenção está

agregando valor. Os outros dois componentes, MTTO e MTTY, estão fazendo referência a atividades que não agregam valor para a manutenção. Entretanto, são atividades necessárias. Assim, deve-se buscar alternativas para reduzir essas duas parcelas, através da aplicação do M-VSM.

Dessa forma, os autores Sawhney, Kannan e Li (2009) sugerem um segundo indicador que mede a eficiência da manutenção em relação a agregação de valor, conforme mostra a equação 4.

Eficiência de Manutenção (%) = (MTTR / MMLT) * 100% (Equação 4)

Assim, para o presente trabalho será utilizado o *Jack-knife Diagram* (JKD) em conjunto à análise estatística da confiabilidade para identificação do equipamento com o pior desempenho, relacionando os indicadores MTBF e MTTR. A utilização dessas ferramentas em conjunto servirá de base para o método integrado.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho é classificado em relação à natureza como pesquisa aplicada, fazendo uso das abordagens quantitativas e qualitativas. Já em relação à aos procedimentos utilizados, o trabalho é categorizado como pesquisa ação. O objeto de estudo do trabalho é a unidade de granulação de uma indústria de fertilizantes, onde foi validado o modelo teórico proposto.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho é classificado em relação à natureza como pesquisa aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicações práticas na gestão da manutenção. Ou seja, o trabalho é classificado como pesquisa aplicada pois busca encontrar soluções para problemas específicos na indústria (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

As abordagens quantitativas e qualitativas foram utilizadas no estudo, sendo a abordagem quantitativa predominante. A abordagem quantitativa, segundo Fonseca (2002), é centrada na objetividade, recorrendo a linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno. No estudo, a abordagem quantitativa é

empregada em praticamente todas as etapas do modelo teórico proposto, tais como: análise estatística da confiabilidade, diagrama *Jack-knife*, identificação do equipamento com pior desempenho, análise de criticidade, FMEA e avaliação da eficácia do modelo proposto. Já a abordagem qualitativa, segundo Gerhardt e Silveira (2009), não se preocupa com a representatividade numérica, mas sim com o aprofundamento da compreensão de um grupo social ou de uma organização, buscando explicar o porquê das coisas e exprimindo o que convém ser feito, mas não quantificando os valores. No presente trabalho a abordagem qualitativa foi utilizada na sua grande maioria em conjunto com a abordagem quantitativa, a fim de aumentar o embasamento nas tomadas de decisão. A etapa de definição do equipamento com pior desempenho, por exemplo, foi majoritariamente quantitativa, entretanto fez uso da abordagem qualitativa para a análise de redundância do equipamento no processo produtivo e impacto na qualidade final do produto. Além disso, o M-VSM e a aplicação das ferramentas do *Lean Manufacturing* adotaram predominantemente a abordagem qualitativa.

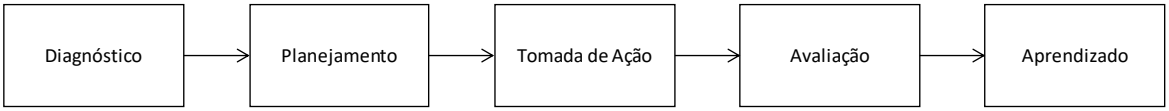
Já em relação aos procedimentos utilizados, o presente trabalho é classificado como pesquisa ação, pois tem como objetivo resolver problemas concretos, onde o pesquisador pressupõe uma participação planejada na situação problemática a ser investigada. Na pesquisa ação, o investigador abandona o papel de somente observar e tem uma atitude participativa em relação ao objeto de estudo, trazendo consigo uma série de conhecimentos que serão substrato para a análise (FONSECA, 2002). O estudo propõe um modelo teórico para auxílio da gestão da manutenção, buscando a validação do modelo em uma aplicação prática, tendo o autor atitude participativa nas ações do trabalho.

O objeto de estudo do presente trabalho é a unidade de granulação em uma indústria de fertilizantes, onde buscou-se a validação do modelo teórico proposto, além de auxiliar na elaboração dele. A unidade de granulação apresentava no início do ano de 2018 valores diários de disponibilidade abaixo da meta, e, consequentemente, volume de produção abaixo do esperado. Com isso, o modelo integrado proposto visa aumentar a disponibilidade dos equipamentos na gestão da manutenção, integrando análise estatística da confiabilidade da unidade produtiva com os conceitos e ferramentas do *Lean Manufacturing*.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Como comentando, o presente trabalho faz uso da pesquisa ação, pois procura superar lacunas entre a teoria e a prática, onde o autor interage no decorrer do próprio processo de pesquisa e não somente como possível consequência de uma recomendação na etapa final do trabalho (MELLO, 2012). As etapas macro da pesquisa podem ser observadas na figura 6.

Figura 6 - Fluxograma das etapas macro da pesquisa.

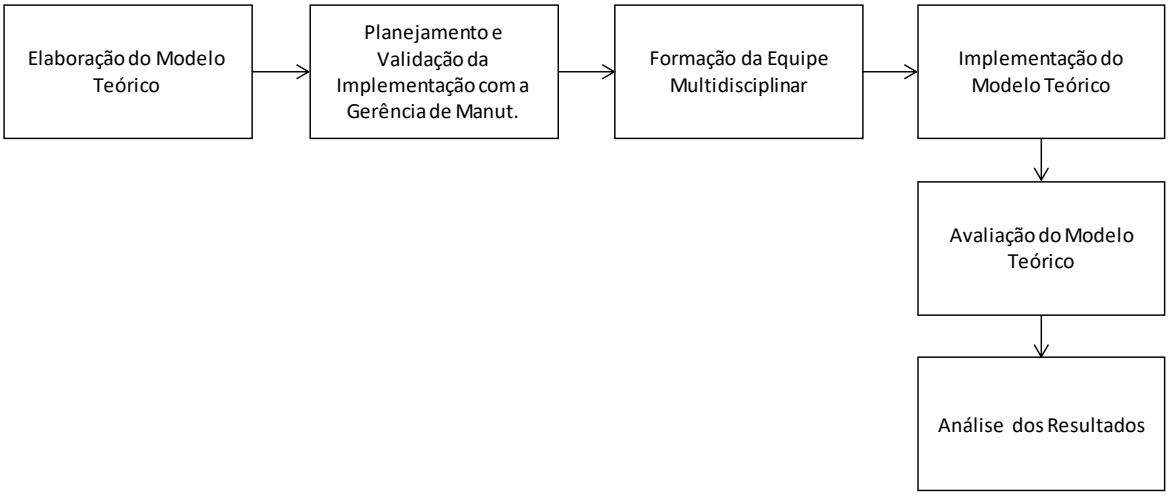


Fonte: Adaptado de Mello (2012).

A pesquisa ação começa com a etapa de diagnóstico (etapa 1), onde identificou-se o problema a ser resolvido (MELLO, 2012). No presente trabalho, o problema foi identificado por meio da necessidade da empresa em questão, que apresentava no início de 2018 valores de disponibilidade abaixo da meta estipulada.

A etapa seguinte, etapa 2, foi a de planejamento, responsável por delinear a pesquisa, contendo todas as suas etapas e a forma de condução. A figura 7 traz uma visão do planejamento realizado para o decorrer do trabalho.

Figura 7 - Etapas Planejadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No planejamento do trabalho visto na figura 7, iniciou-se pela elaboração do modelo teórico proposto, baseado na revisão da literatura e suportado pelo objeto de estudo. O modelo teórico desenvolvido buscou auxiliar na tomada de decisão dos gestores, utilizando de forma integrada os indicadores MTBF e MTTR. As próximas duas etapas: planejamento e validação da implementação com a gerência da manutenção e formação da equipe multidisciplinar; são pré-requisitos para a etapa seguinte de implementação do modelo. A etapa formação da equipe precisou ser multidisciplinar, visto a complexidade do estudo e a relação com as grandes áreas da empresa: manutenção, produção, qualidade e segurança. Ademais, a equipe precisou envolver além do corpo técnico, pessoas do “chão de fábrica” para contribuir com a visão do *gemba*. Por fim, após a etapa implementação do modelo no objeto de estudo, foi realizada a etapa avaliação do modelo e a análise dos resultados da unidade produtiva após a implementação. A etapa implementação do modelo teórico foi realizada na unidade de granulação da empresa de fertilizantes. Esta unidade em termos de negócio é um diferencial competitivo para a empresa, pois ela é a principal responsável pela produção do fertilizante, destacando a empresa em relação as demais que precisam comprar o fertilizante e fazem somente a mistura de acordo com o *mix* de produção solicitado pelos clientes. A unidade de granulação da empresa em questão é responsável por produzir mais de 2.000 toneladas por dia de fertilizante, onde qualquer parada de produção tem impacto significativo nas margens de lucro. Além disso, vale contextualizar que o setor de manutenção da empresa como um todo, que também atende a unidade de granulação, já havia se estruturado há mais de três anos, ou seja, havia implementado o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), fato que auxiliou na implementação do modelo proposto e avaliação dos resultados, pelo fato de já possuir uma gestão dos indicadores sistematizada.

A etapa seguinte da pesquisa, na figura 6, tomada de ação (etapa 3), é a responsável pela execução das seguintes atividades: elaboração do modelo teórico, validação com a gerência da manutenção, formação da equipe multidisciplinar e implementação do modelo na unidade produtiva. O modelo teórico elaborado e implementado na unidade produtiva, baseou-se na análise estatística da confiabilidade devido a complexidade do objeto de estudo, iniciando a análise pela

unidade produtiva e realizando o desdobramento até o nível do equipamento, a fim de identificar o equipamento com o pior desempenho da unidade. Assim, o modelo teórico desenvolvido nesta etapa buscou fornecer aos gestores maior clareza para a tomada de decisão, tanto em relação a identificação do equipamento com o pior desempenho da unidade produtiva quanto em relação ao impacto dos indicadores MTTR e MTBF.

Após a implementação do modelo teórico, a etapa seguinte (etapa 4) é a de avaliação do modelo. Nesta etapa foi possível avaliar a eficácia do modelo por meio dos resultados obtidos com a aplicação prática, além de verificar algumas oportunidades e premissas que precisam ser cumpridas para o atingimento do objetivo.

Por fim, na última etapa do trabalho, etapa de aprendizado (etapa 5), discutiu-se os resultados globais do modelo proposto na unidade produtiva. Além disso, procurou-se comparar as ferramentas utilizadas no modelo com outras disponíveis, a fim de permitir aos gestores a utilização de outras ferramentas no modelo, de acordo com o problema a ser resolvido, disponibilidade de recursos e o tipo de negócio/segmento da empresa em estudo.

4 RESULTADOS

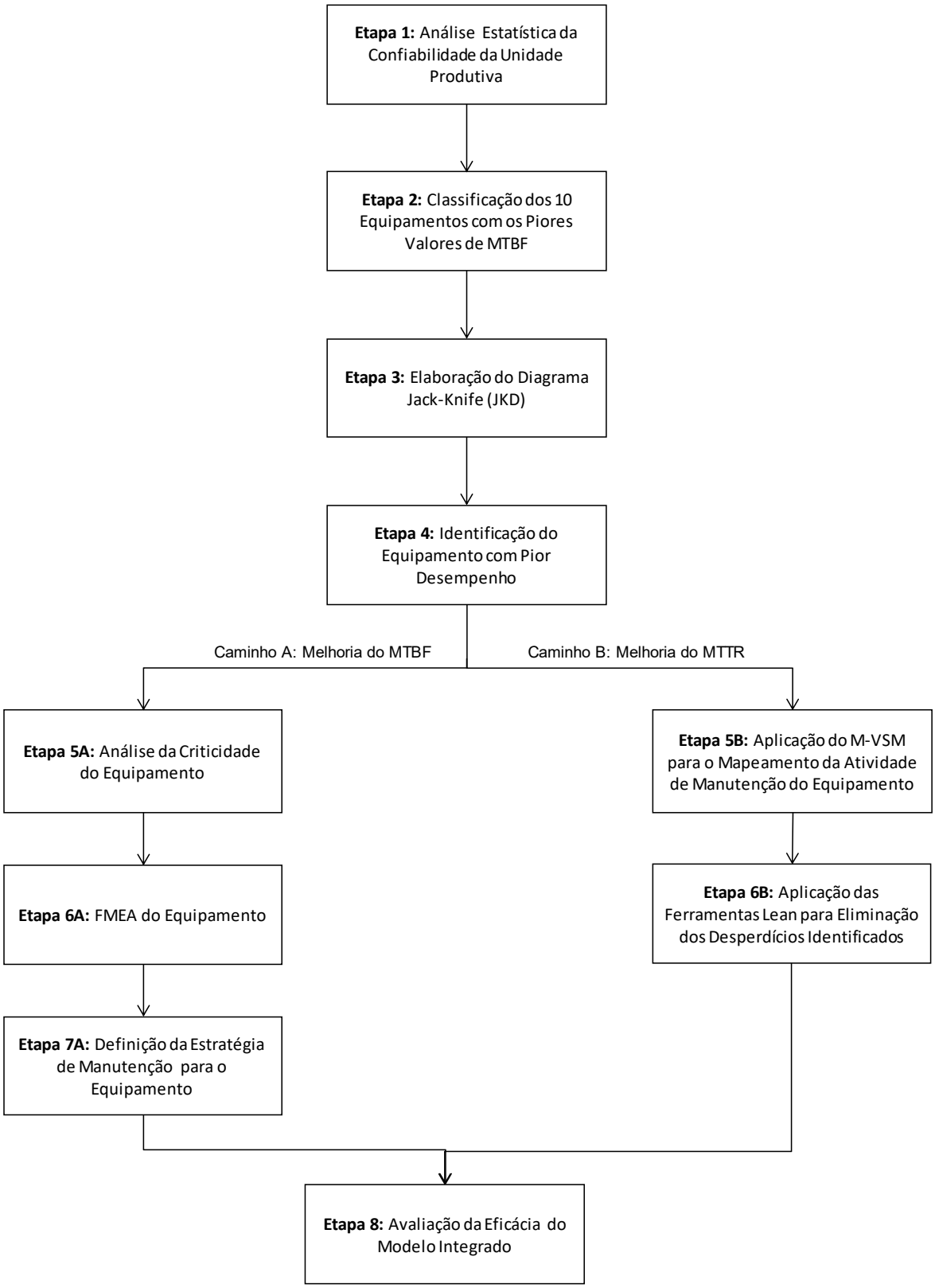
O presente trabalho buscou solucionar o *gap* identificado na indústria, desenvolvendo um método capaz de avaliar os indicadores MTTR e MTBF de forma integrada, permitindo uma melhor tomada de decisão na gestão da manutenção para aumento da disponibilidade dos equipamentos. A unidade produtiva de granulação da empresa de fertilizantes apresentava baixos valores de disponibilidade (70% para uma meta de 90%) no início do ano de 2018.

Para isso, o trabalho propõe um modelo integrado teórico, utilizando os dados da unidade de granulação como apoio para a construção do modelo. O modelo teórico é validado por meio do estudo de caso do objeto de estudo, finalizando com a avaliação da eficácia através da comparação dos resultados obtidos na prática.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO TÉORICO

O modelo integrado proposto no presente trabalho é ilustrado no fluxograma da figura 8.

Figura 8 - Modelo teórico proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A base do modelo consiste na análise estatística da confiabilidade da unidade produtiva (etapa 1), que neste caso é a unidade de granulação, servindo como direcionamento para as três etapas seguintes e chegando até a identificação do equipamento com o pior desempenho. Ou seja, as quatro primeiras etapas do modelo integrado proposto precisam ser realizadas de forma mais detalhada possível, pois são elas as responsáveis por identificar e selecionar o equipamento a ser analisado.

A definição do MTBF na etapa 2, como critério para seleção inicial dos equipamentos, se deu devido a importância da confiabilidade dos equipamentos para o negócio do objeto de estudo, visto que qualquer parada da unidade produtiva possui um alto impacto. Ou seja, definiu-se o MTBF como indicador prioritário para unidade produtiva, ao invés do MTTR. Isso porque o tempo necessário para colocar toda a unidade produtiva em operação é muito elevado, sendo assim é mais importante evitar ou postergar toda e qualquer parada de fábrica do que tornar os reparos das falhas mais rápidos. Vale ressaltar também que devido a limitação dos dados disponíveis, não é possível a análise dos equipamentos em relação ao MTTF.

Já na etapa de número 3, que consiste na elaboração do diagrama *Jack-knife* (JKD), utiliza-se simultaneamente os indicadores MTBF e MTTR dos dez equipamentos selecionados na etapa 2, permitindo a identificação do equipamento com o pior desempenho da unidade (etapa 4). A utilização do MTBF ocorre de forma indireta na abcissa por meio do número de eventos de falha.

A partir da identificação do equipamento, o modelo sugere dois caminhos a serem seguidos, o caminho A visando a melhoria da confiabilidade por meio do MTBF, e o caminho B que visa a redução do MTTR do equipamento com pior desempenho. Dessa forma, o modelo busca o aumento da disponibilidade do equipamento selecionado por meio da melhoria de ambos os indicadores que são responsáveis pela disponibilidade, conforme mostrou a equação 1.

O caminho A visa o aumento do MTBF do equipamento através da aplicação da análise de criticidade (etapa 5A) e FMEA do equipamento (etapa 6A), para posterior definição da estratégia de manutenção mais assertiva para o ativo (etapa 7a). A análise de criticidade é fundamental para a definição do grau de abrangência dos planos de manutenção, definindo a necessidade de rotinas de inspeção, manutenção preventiva e/ou preditiva. Já o FMEA tem como objetivo direcionar

quais componentes do equipamento necessitam de atenção, ou seja, quais componentes precisam ser contemplados na estratégia de manutenção. Com os dois métodos desenvolvidos, chega-se a uma estratégia de manutenção para o equipamento.

O caminho B objetiva reduzir o MTTR do equipamento através da aplicação do M-VSM (etapa 5B) para o mapeamento dos desperdícios ao longo da atividade de manutenção do equipamento. Posteriormente, aplica-se as ferramentas e os conceitos do *Lean Manufacturing* (etapa 6B) para eliminação/redução dos desperdícios mapeados, que ocorrem desde o planejamento da atividade até a execução.

Por fim, o modelo integrado propõe a verificação da eficácia das ações implementadas, tanto do viés da eficácia da estratégia de manutenção (caminho A) quanto das ações de melhoria propostas através dos conceitos e ferramentas do *Lean Manufacturing* (caminho B), permitindo conclusões quanto a eficácia do modelo integrado proposto.

4.1.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CONFIABILIDADE DA UNIDADE PRODUTIVA E CLASSIFICAÇÃO DOS 10 EQUIPAMENTOS COM OS MENORES VALORES DE MTBF

A base de dados empregada para a análise estatística da confiabilidade da planta de granulação foi o *Uptime* do setor de produção, considerando o período de 1° de janeiro de 2017 até 30 de abril de 2018. Está base de dados mostra todos os eventos que impactaram na produção, sendo que somente os eventos categorizados como *unscheduled* e *rate reduction* foram considerados, ou seja, eventos não programados que pararam a unidade e/ou baixaram o ritmo da produção.

A análise de confiabilidade foi realizada através do *software* Proconf, avaliando a distribuição dos dados de falha no tempo, além da curva de confiabilidade e a taxa de falha. Com isso, realizou-se o cálculo do MTBF da planta de granulação. Essa informação foi preponderante para a seleção do MTBF como indicador prioritário para a etapa 2.

Por fim, a análise da disponibilidade (A) da unidade de granulação foi calculada, considerando as horas calendário (B), horas de parada programada (C) e horas de parada não programada, conforme mostra a equação 5.

$$A = (B – C – D) / B \quad \text{(Equação 5)}$$

Da mesma forma que para a planta de granulação, utilizou-se o *software* Proconf para a análise por equipamento. A única diferença foi nos dados analisados, para a planta de granulação foram utilizados os eventos de falha em horas, devido a existência de mais de um evento no mesmo dia. Entretanto não havia a hora exata do evento, somente a data e a duração, sendo assim considerou-se que os eventos ocorreram sempre 00:00, nas situações em que haviam mais de um evento no mesmo dia, distribuiu-se os eventos de forma linear. Já para os equipamentos, pôde-se utilizar os eventos em dias. A escolha da unidade de medida em dias ao invés de horas para os equipamentos aconteceu a fim de evitar a distorção dos resultados, visto a incerteza na hora exata registrada do evento e o baixo número de eventos por equipamento.

Logo, realizou-se os cálculos do MTBF por equipamento, definindo a distribuição que melhor representa cada conjunto de dados. As distribuições possíveis no *software* são: Weibull, Gama, Lognormal, exponencial ou normal. Dessa forma, foi possível identificar os dez equipamentos com os piores valores de MTBF da planta de granulação.

4.1.2 ELABORAÇÃO DO *JACK-KNIFE DIAGRAM* (JKD) E IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO COM O PIOR DESEMPENHO

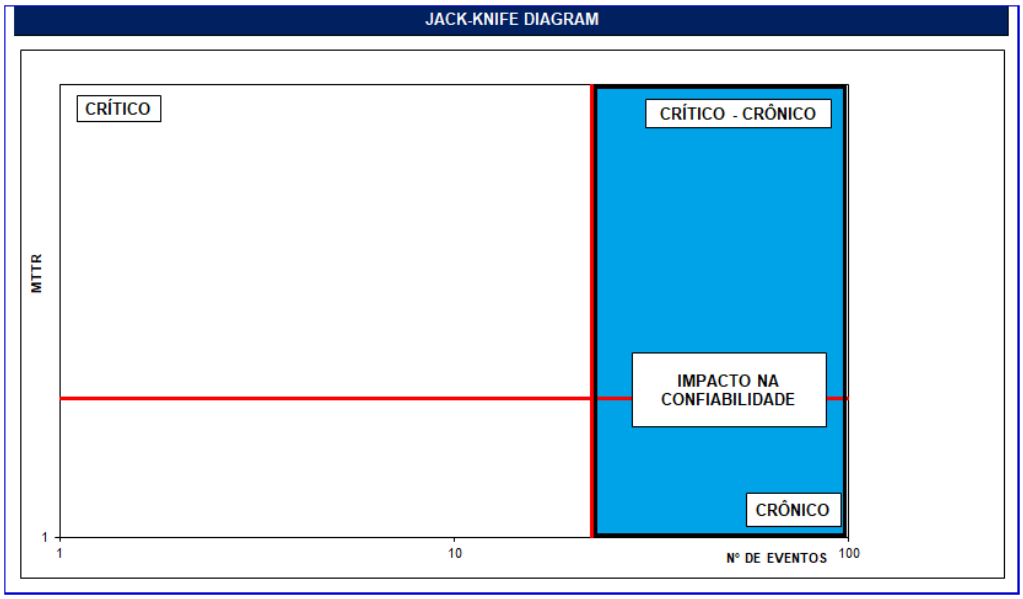
A partir da identificação dos 10 equipamentos com os piores valores de MTBF, utilizou-se o método do *Jack-Knife Diagram (JKD)* para classificar os 10 equipamentos em relação ao impacto em disponibilidade, confiabilidade e mantenabilidade.

Na abscissa do diagrama JKD está o número de eventos ocorridos para cada equipamento e na ordenada encontra-se o MTTR, conforme visto anteriormente na figura 3. A escolha do número de eventos (N) na abscissa permite a identificação

dos equipamentos que estão afetando mais a confiabilidade (MTBF) da planta, conforme mostra a equação 6 e figura 9 (KNIGHTS, 2004).

MTBF = Tempo de Operação / N (Equação 6)

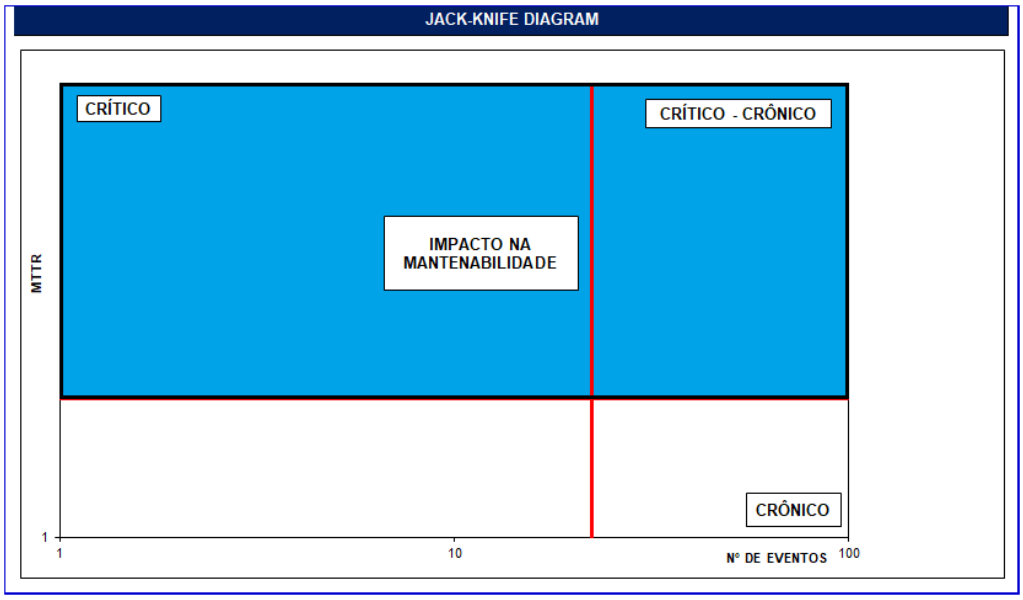
Figura 9 - *Jack-knife Diagram* ilustrando o impacto na confiabilidade.



Fonte: Adaptado de Knights (2004).

Já a escolha do MTTR para a ordenada permite a identificação dos equipamentos que mais impactam na mantenabilidade, pois um alto valor de MTTR remete a maiores tempos de intervenção, conforme mostra a figura 10.

Figura 10 - *Jack-knife Diagram* ilustrando o impacto na mantenabilidade.



Fonte: Adaptado de Knights (2004).

Dessa forma, o diagrama permite a avaliação da disponibilidade pela relação entre o MTBF e o MTTR, conforme mostrou a equação 1, onde a disponibilidade do equipamento pode ser aumentada por meio da redução do MTTR, aumento do MTBF ou a combinação de ambos (KNIGHTS, 2004).

Em relação aos limites dos quadrantes, eles foram calculados com base nos equipamentos analisados, utilizando o número de eventos (N), a duração total dos eventos (D) e o número de equipamentos em análise (Q). Através das equações 7 e 8 foram determinados os limites horizontal e vertical dos quadrantes (KNIGHTS, 2004).

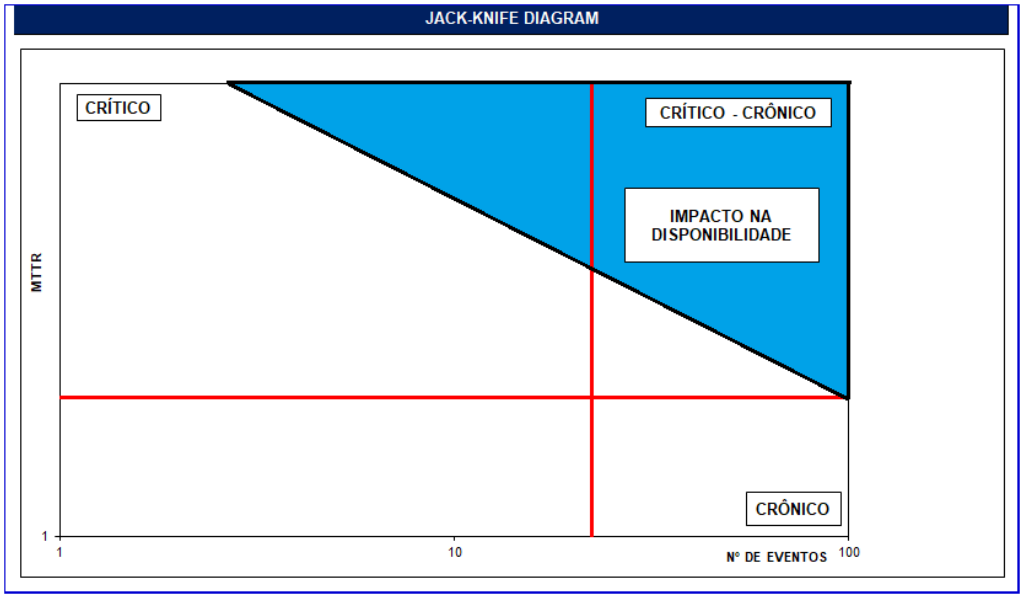
$$LimH = D / N \quad \text{(Equação 7)}$$

$$LimV = N / Q \quad \text{(Equação 8)}$$

Com o diagrama elaborado foi possível definir o equipamento com pior desempenho. Quanto mais a direita estiver localizado o equipamento no diagrama, maior o impacto na confiabilidade (MTBF), ou seja, o equipamento é classificado como crônico, pois o equipamento teve mais eventos de falha (figura 9). Já os equipamentos localizados na parte superior do diagrama, impactam mais na

mantenabilidade (MTTR), sendo classificados como críticos, pois a duração destes eventos de falha teve maior duração (figura 10). Logo, o equipamento que estiver localizado mais à direita e mais acima é considerado o equipamento com pior desempenho, sendo classificado como crítico e crônico, afetando a disponibilidade do equipamento visto que ele possui piores valores de MTBF e MTTR. A figura 11 ilustra o posicionamento dos equipamentos que mais impactam na disponibilidade.

Figura 11 - *Jack-knife Diagram* ilustrando o impacto na disponibilidade.



Fonte: Adaptado de Knights (2004).

A partir da seleção do equipamento com pior desempenho, iniciou-se o desdobramento da análise por indicador (MTBF e MTTR), seguindo os caminhos A e B.

4.1.3 ANÁLISE DA CRITICIDADE DO EQUIPAMENTO

A análise de criticidade do equipamento selecionado foi realizada pela equipe multidisciplinar que participou de todas as etapas da análise de criticidade e do FMEA, envolvendo pessoas da gestão e do “chão de fábrica”, a fim de se ter a melhor análise possível. A metodologia para classificação da criticidade foi baseada nos estudos de Fabro (2003) e Fuentes (2006), nos quais inicialmente definiu-se os

fatores que compõem a avaliação para definição da criticidade do equipamento, conforme mostra o quadro 1.

Quadro 1 - Fatores considerados na avaliação da criticidade

Item	Categoria
A	Segurança das pessoas e impacto no meio ambiente
B	MTTR/MTBF
C	Nível de redundância
D	Origem
E	Mão de obra
F	Qualidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estes fatores foram definidos com base nos aspectos considerados significativos para a empresa, além de serem relevantes para a escolha da estratégia de manutenção a ser adotada nos equipamentos. Com isso, pode-se realizar a avaliação numérica de relações funcionais de Mudge, cuja metodologia compara os fatores individualmente, determinando o quanto um fator é mais importante do que o outro, de acordo com a seguinte classificação (FABRO, 2003):

- 1 – Pouco mais importante;
- 3 – Moderadamente mais importante;
- 5 – Muito mais importante.

A figura 12 mostra o modelo do diagrama de Mudge utilizado para comparar cada fator individualmente, segundo a classificação mencionada. Após a avaliação de todos os fatores foi encontrada a parcela de contribuição que cada um teve na definição da criticidade do ativo.

Figura 12 - Relações funcionais de Mudge

	B	C	D	E	F	Soma	Contribuição
A							
B							
C							
D							
E							
F							

Fonte: Adaptado de Fabro (2003).

A contribuição de cada fator foi então multiplicada pelo peso do próprio fator em relação ao equipamento em questão. Este peso foi estabelecido conforme mostra a figura 35 no apêndice.

Dessa forma, com a contribuição de cada categoria e o seu respectivo peso, encontrou-se o valor da criticidade por categoria, sendo a nota final do equipamento é a soma de todos estes valores. Logo, a definição da criticidade do equipamento é obtida através da nota final da seguinte forma:

- Nota final < 0,5: não importante;
- 0,5 ≤ Nota final < 0,75: importante;
- Nota final ≥ 0,75: crítico.

A figura 13 ilustra o modelo resumo utilizado para definir a criticidade dos ativos.

Figura 13 - Resumo da avaliação de criticidade.

Item	Categoria	Contribuição	Peso	Criticidade
A	Segurança das pessoas e impacto no meio ambiente			
B	MTTR/MTBF			
C	Nível de redundância			
D	Origem			
E	Mão de obra			
F	Qualidade			
			Nota	
			Criticidade	

Fonte: Adaptado de Fabro (2003).

Portanto, conforme mencionado anteriormente, a criticidade do equipamento define a estratégia de manutenção a ser adotada no equipamento em relação a abrangência dos planos de manutenção. Dentro do modelo integrado, esta etapa atua em conjunto ao FMEA do equipamento, pois através do FMEA identifica-se os componentes que precisam ser contemplados nos planos de manutenção e quais as causas a serem tratadas.

4.1.4 FMEA DO EQUIPAMENTO

Na elaboração do FMEA utilizou-se 11 etapas, seguindo as recomendações de Carlson (2012), conforme mostra o quadro 2. As etapas do trabalho foram desenvolvidas em reuniões de duas horas, com frequência de duas reuniões por semana e com a mesma equipe da análise de criticidade.

Quadro 2 - Etapas para elaboração do FMEA.

Etapas para Elaboração do FMEA	
N°	**Etapa**
1.	Elaborar lista com os componentes do equipamento;
2.	Definir a função dos componentes para o equipamento;
3.	Identificar os potenciais modos de falha dos componentes;
4.	Identificar os potenciais efeitos das falhas dos componentes;
5.	Classificar os potenciais efeitos em relação à sua severidade;
6.	Identificar as potenciais causas das falhas dos componentes;
7.	Classificar as potenciais causas em relação à sua ocorrência;
8.	Identificar os controles atuais utilizados detectar as potenciais causas das falhas;
9.	Classificar os controles atuais em relação à sua capacidade de prevenção/detecção;
10.	Calcular o número de prioridade de risco (RPN - Risk Priority Number);
11.	Recomendar ações para os modos de falha com elevado RPN.

Fonte: Adaptado de Carlson (2012).

As etapas de número 5, 7 e 9 que são etapas de classificação, tiveram a metodologia de classificação definida com base nos estudos de Carlson (2012). Entretanto algumas adaptações foram realizadas ao método, a fim de atender as particularidades da empresa. A metodologia de Carlson (2012) possibilita a classificação em uma escala de 1 a 10, contudo devido à uma menor base de dados e de parâmetros para tal classificação, fez-se uso de uma escala de 1 a 5.

Para a metodologia de classificação da severidade dos efeitos das falhas, etapa 5, foram utilizados os dados de falha do equipamento, considerando os quartis dos

dados para os limites em termos de parada de fábrica. O quadro 3 abaixo mostra os critérios definidos para esta etapa.

Quadro 3 - Critérios para classificação dos efeitos quanto a severidade.

Severidade	Critério
Muito Baixa	Sem efeito operacional, de segurança, de meio ambiente e na qualidade do produto.
Baixa	Impacto na qualidade do produto, precisando repassar o mesmo. Impacto ambiental dentro da unidade.
Moderada	Equipamento para de funcionar (tempo de reparo < 2h). Impacto na qualidade do produto, precisando reprocessar o mesmo. Baixo risco de segurança. Impacto ambiental na vizinhança.
Alta	Equipamento para de funcionar (tempo de reparo 2-5h). RQA (risco controlável). Risco de notificações/descumprimento de normas ambientais.
Muito Alta	Equipamento para de funcionar (tempo de reparo > 5h). Risco alto de segurança (não controlável). Risco de embargo da unidade por questões ambientais.

Fonte: Adaptado de Carlson (2012).

Em relação as etapas 7 e 9: classificação das potenciais causas em relação a ocorrência e classificação dos controles atuais em relação a capacidade de detecção; o grupo de trabalho desenvolveu os seguintes critérios, baseado na metodologia de Carlson (2012), conforme mostram os quadros 4 e 5.

Quadro 4 - Critérios para classificação das causas quanto a ocorrência.

Índice	Ocorrência	Critério
1	Falha improvável	Não há histórico de falha.
2	Falha rara ou não periódica	A falha ocorre raramente.
3	Falha ocasional, não regular.	A falha ocorre eventualmente e sem uma frequência conhecida.
4	Falha periódica.	A falha ocorre com maior frequência e com frequência conhecida.
5	Falha inevitável.	A falha ocorre com alta frequência e é natural do processo.

Fonte: Adaptado de Carlson (2012).

Quadro 5 - Critérios para classificação dos controles quanto a detecção.

Índice	Detecção	Critério
1	Quase sempre	Quase sempre se detecta
2	Alta	Possível detecção e boa precisão de TBF *(Time Between Failures*)
3	Moderada	Possível detecção e média precisão de TBF *(Time Between Failures)*
4	Baixa	Possível detecção e sem precisão de TBF *(Time Between Failures)*
5	Sem detecção	Não é possível detectar

Fonte: Adaptado de Carlson (2012).

Na identificação dos controles atuais para detecção das potenciais causas das falhas, etapa 8, considerou-se todos os controles utilizados, até mesmo aqueles que não estavam cadastrados no SAP. Devido a multidisciplinariedade da equipe, foi possível identificar estes controles que não estavam cadastrados no sistema, evitando assim a distorção dos valores da classificação final.

Após a identificação e classificação dos modos de falha, efeitos, causas e controles atuais utilizados, iniciou-se a etapa 10: calcular o número de prioridade de risco (RPN), conforme mostra a equação 9.

RPN = S X O X D (Equação 9)

No cálculo do RPN é levado em consideração as três classificações anteriores: severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D). Através do RPN é possível criar um ranking com a classificação geral de cada modo de falha, quanto maior o valor do RPN mais prioritário é o modo da falha (CARLSON, 2012).

Por fim, na última etapa da elaboração do FMEA (etapa 11), as recomendações para os modos de falha com maior valor de RPN foram direcionadas através da elaboração dos planos de manutenção, onde abrangeu-se os componentes e os seus respectivos modos de falha.

4.1.5 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO PARA O EQUIPAMENTO

A definição da estratégia de manutenção para o equipamento foi baseada na criticidade encontrada e em conjunto ao FMEA, tal que quanto maior o grau de criticidade do equipamento a estratégia deve ser a mais completa possível. No modelo proposto, como o equipamento foi classificado como crítico, deve possuir planos de manutenção preditiva e/ou planos de manutenção preventiva (SMITH; MOBLEY, 2011).

Os planos de manutenção elaborados para o equipamento foram baseados no FMEA, onde foram priorizados os modos de falha classificados com o maior RPN. Segundo estudo de Herpich e Fogliatto (2013), onde foi implementado o FMEA em um sistema de controle e instrumentação de um turbogerador, pôde observar que por meio da aplicação do FMEA é possível otimizar os planos de manutenção tradicionais.

Além disso, também foram priorizados nos planos de manutenção os modos de falha com altos valores de severidade, mesmo que possuam RPN menor. Essa estratégia foi adotada seguindo as recomendações de Carlson (2012), pois o RPN analisado individualmente apresenta algumas limitações, sendo essa uma delas. Pois alguns modos de falha que apresentam alta severidade aos efeitos podem ter seu valor de RPN diminuídos pela baixa ocorrência ou fácil detecção, entretanto se ele vier a ocorrer pode apresentar um alto risco às operações da empresa.

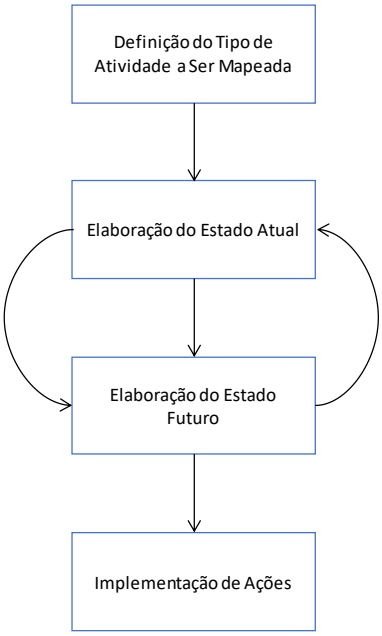
Os planos de manutenção foram desenvolvidos diretamente no SAP, onde já existe um padrão estabelecido de plano, contendo: etapas da atividade, tipo de disciplina (elétrica ou mecânica), duração do trabalho de cada etapa em minutos, número de pessoas necessárias em cada etapa e duração em minutos de cada etapa. O trabalho citado de cada etapa é a multiplicação do número de pessoas pela duração.

4.1.6 APLICAÇÃO DO M-VSM PARA O MAPEAMENTO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DO EQUIPAMENTO E APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DO *LEAN* PARA ELIMINAÇÃO DOS DESPERDÍCIOS

No modelo integrado proposto foi utilizado o M-VSM para mapeamento dos desperdícios ao longo da atividade de manutenção do equipamento selecionado, visando a redução do MTTR do equipamento. Por meio do M-VSM buscou-se identificar as oportunidades ao longo de todas as etapas da manutenção, desde a chegada da informação da falha no equipamento, passando pela organização da atividade e chegando até a execução dela. As oportunidades identificadas foram então tratadas utilizando alguns dos conceitos e ferramentas do *Lean*, tais como: kanban de materiais, aproximação dos materiais e ferramentas do posto de trabalho, 5S, rotas de abastecimento e gestão à vista.

O M-VSM é o equivalente ao tradicional VSM, com algumas ressalvas por se tratar de um serviço não regular, e não de um processo de fabricação em série. Além disso, há uma dificuldade em utilizar a mesma simbologia do VSM pela particularidade do serviço de manutenção (PINTO, 2013). Dessa forma, a elaboração do M-VSM seguiu as etapas do fluxograma da figura 14, baseado na metodologia tradicional do VSM de Rother e Shook (2003):

Figura 14 - Etapas do M-VSM.



Fonte: Adaptado de Rother e Shook (2003).

A primeira etapa do M-VSM foi a definição do tipo de atividade a ser mapeada no equipamento. Ou seja, foi definido nesta etapa se o M-VSM seria aplicado em atividades de manutenção corretiva ou preventiva. Neste ponto, há uma analogia com o método do VSM tradicional proposto por Rother e Shook (2003), onde inicia-se o método pela definição da família do produto a ser analisada.

A etapa seguinte foi a realização do mapeamento em campo do fluxo de material e informação da atividade, servindo como base para a elaboração do mapa do estado atual. A partir disso, utilizou-se os princípios do *Lean* para identificar oportunidades de melhoria e agregar mais valor para a atividade. Pinto (2013) recomenda na elaboração do estado atual o envolvimento das pessoas chave da cadeia de valor em análise, a fim de incentivar a verem o todo e não só o seu departamento.

As oportunidades identificadas foram utilizadas na elaboração do estado futuro, que é a terceira etapa da figura 14. Na elaboração do estado futuro, além dos princípios do *Lean*, empregou-se os conceitos dos indicadores utilizados no M-VSM por Sawhney, Kannan e Li (2009), a fim de observar os desperdícios na organização das atividades, no reparo do equipamento em si e no tempo após reparo para início da operação. O objetivo do estado futuro é a ausência de desperdícios em toda a cadeia de valor, entretanto, para alcançar tal estado são necessárias várias etapas

de transformação do estado futuro em estado atual, onde gradualmente permitirão alcançar o estado ideal (PINTO, 2013).

A transformação do estado futuro (teórico) em novo estado atual é a última etapa do M-VSM. Essa etapa é a de implementação das ações que haviam sido mapeadas no momento da elaboração do mapa do estado futuro.

4.1.7 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO MODELO INTEGRADO

Com a estratégia de manutenção definida e as melhorias oriundas do *Lean Manufacturing* implementadas no final de 2018, o último passo do trabalho foi a avaliação da eficácia das ações. Com isso, foi possível validar o modelo integrado proposto que visa a melhoria da disponibilidade da manutenção.

Portanto, como havia sido calculado os valores de MTBF e MTTR para o equipamento no ano de 2017/2018, foi possível calcular os valores para o ano de 2019 e, com isso, comparar com os valores iniciais, avaliando a eficácia do estudo.

4.2 APLICAÇÃO DO MODELO INTEGRADO NA UNIDADE DE GRANULAÇÃO

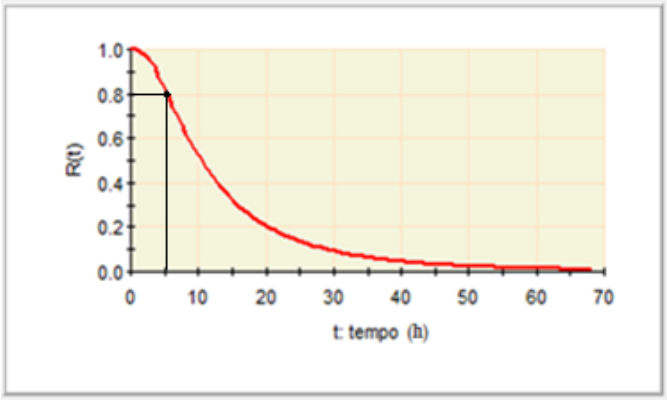
A análise estatística da confiabilidade da planta de granulação em estudo, em conjunto ao *Jack-Knife Diagram*, permitiu a identificação do equipamento com o pior desempenho, considerando os indicadores MTBF e MTTR. A partir disso, os dois caminhos foram seguidos buscando a melhoria dos indicadores, um através da definição da estratégia de manutenção para o equipamento e o outro pela eliminação dos desperdícios ao longo da atividade de manutenção. A aplicação dos dois caminhos se fez necessária devido à criticidade do equipamento para o negócio e o baixo desempenho em relação a ambos os indicadores.

4.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CONFIABILIDADE DA PLANTA DE GRANULAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS 10 EQUIPAMENTOS COM OS MENORES VALORES DE MTBF

A análise do tempo médio entre falhas (MTBF) da planta de granulação foi de 14,32 horas para um intervalo de confiança de 95%, sendo a lognormal a

distribuição que melhor representou os dados da planta. A figura 15 ilustra a curva de confiabilidade.

Figura 15 - Curva de confiabilidade dos dados da planta de granulação através do software Proconf.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A confiabilidade da planta para cada período é exibida na tabela 2, onde pode-se observar que para operar com uma confiabilidade de 80%, a planta necessita em média de uma intervenção a cada 5 horas. Essa confiabilidade de 80% para o tempo de 5 horas também pode ser vista na figura 15.

Tabela 2 - Dados de confiabilidade da planta de granulação para cada período de tempo

Tempo (horas)	*Confiabilidade*	*Densidade Acumulada de Falha*	*Densidade de Probabilidade*	*Taxa de Falha*
0	1	0	0	0
0,6881	0,9997	3,16E-04	0,0039	0,0039
1,3762	0,9946	0,0054	0,0149	0,015
2,0643	0,9792	0,0208	0,0301	0,0307
2,7524	0,9532	0,0468	0,044	0,0462
3,4405	0,9186	0,0814	0,0544	0,0592
4,1286	0,8783	0,1217	0,061	0,0695
4,8167	0,8346	0,1654	0,0645	0,0773
5,5048	0,7895	0,2105	0,0657	0,0832
6,1929	0,7443	0,2557	0,0651	0,0875
6,881	0,6999	0,3001	0,0634	0,0906
7,5692	0,657	0,343	0,061	0,0928
8,2573	0,6159	0,3841	0,0581	0,0944
9,6335	0,5402	0,4598	0,0518	0,0959

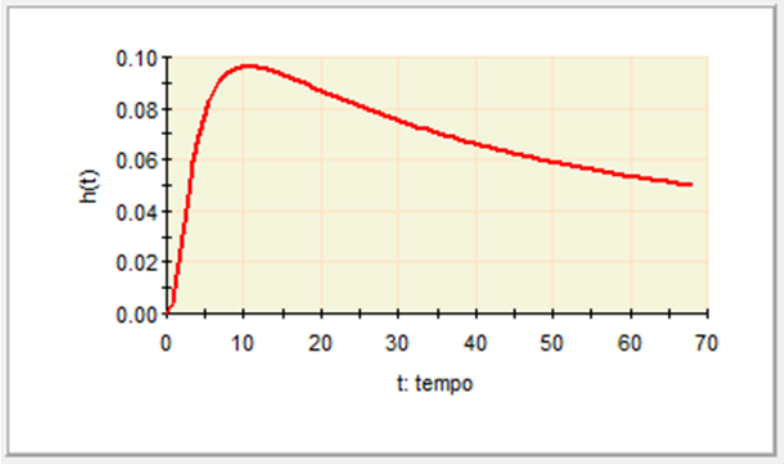
10,3216	0,5057	0,4943	0,0486	0,0962
11,0097	0,4733	0,5267	0,0455	0,0961
11,6978	0,4431	0,5569	0,0425	0,0959
12,3859	0,4149	0,5851	0,0396	0,0954
13,074	0,3886	0,6114	0,0369	0,0949
13,7621	0,3641	0,6359	0,0343	0,0943
14,4502	0,3413	0,6587	0,032	0,0936
15,1383	0,3201	0,6799	0,0297	0,0929
15,8264	0,3004	0,6996	0,0277	0,0921
0	1	0	0	0
0,6881	0,9997	3,16E-04	0,0039	0,0039
1,3762	0,9946	0,0054	0,0149	0,015
2,0643	0,9792	0,0208	0,0301	0,0307
2,7524	0,9532	0,0468	0,044	0,0462
3,4405	0,9186	0,0814	0,0544	0,0592
4,1286	0,8783	0,1217	0,061	0,0695
4,8167	0,8346	0,1654	0,0645	0,0773
5,5048	0,7895	0,2105	0,0657	0,0832
6,1929	0,7443	0,2557	0,0651	0,0875
6,881	0,6999	0,3001	0,0634	0,0906
7,5692	0,657	0,343	0,061	0,0928
8,2573	0,6159	0,3841	0,0581	0,0944
9,6335	0,5402	0,4598	0,0518	0,0959
10,3216	0,5057	0,4943	0,0486	0,0962
11,0097	0,4733	0,5267	0,0455	0,0961
11,6978	0,4431	0,5569	0,0425	0,0959
12,3859	0,4149	0,5851	0,0396	0,0954
13,074	0,3886	0,6114	0,0369	0,0949
13,7621	0,3641	0,6359	0,0343	0,0943
14,4502	0,3413	0,6587	0,032	0,0936
15,1383	0,3201	0,6799	0,0297	0,0929
15,8264	0,3004	0,6996	0,0277	0,0921

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da análise dos dados da granulação, observou-se que a taxa de falha da unidade é crescente até certo período, mais precisamente até 10,32 horas, e diminui com o aumento do tempo após este período. Este fenômeno pode ser visualizado na tabela 2, onde a confiabilidade da planta diminuiu de forma mais lenta após o

período citado, pois a taxa de falha também diminuiu. Ademais, a figura 16 auxilia nesta observação, mostrando a taxa de falha da planta no período em análise.

Figura 16 - Curva da taxa de falha da planta de granulação realizada através do software Proconf.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a disponibilidade da planta no período observado foi calculada conforme a equação 5 já citada, encontrando-se um valor de 70%.

Após a análise global da unidade (etapa 1), voltou-se o estudo para cada equipamento da planta de granulação. O cálculo do MTBF (etapa 2) foi realizado para cada um dos equipamentos, a fim de investigar os possíveis responsáveis pelo desempenho da planta. A tabela 7 no Apêndice mostra os equipamentos e o valor de MTBF para cada um deles, além da distribuição que melhor representa os dados, segundo o índice de significância. Os equipamentos que não aparecem na tabela 7 foram os que não tiveram eventos de produção classificados como *unscheduled* e *rate reduction* ou tiveram somente um evento no período observado, não sendo relevante na análise.

A distribuição que melhor representa os dados foi realizada pelo *software* Proconf, que utiliza dois testes de aderência: teste analítico qui-quadrado (x^2) e teste analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Além dos testes de aderência, pode-se escolher a distribuição que melhor representa os dados através de histogramas de frequência, ou seja, pelo método gráfico.

Os dois testes analíticos de aderência citados apresentam estrutura de um teste de hipótese, em que a hipótese nula é de que os dados sigam uma determinada distribuição hipotetizada. O teste do qui-quadrado calcula a soma dos quadrados

das diferenças entre frequências esperadas e frequências empíricas observadas em diferentes intervalos de classe. Se a soma ultrapassar um determinado valor tabelado, rejeita-se a hipótese. Já o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) é implementado de maneira análoga, entretanto o teste considera frequências acumuladas ao invés de frequências absolutas, ou seja, a frequência registrada em um intervalo de classe é acumulada nos intervalos seguintes (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

A fim de identificar o equipamento com o pior desempenho na planta de granulação são classificados os 10 equipamentos com os menores valores de MTBF e suas respectivas distribuições, conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Top 10 dos piores equipamentos em termos de MTBF.

Equipamento	MTBF	Distribuição
Transportador 08B	14,11	WEIBULL
Granulador	17,91	WEIBULL
Moinho 01C	18,29	WEIBULL
Moinho 01B	19,77	GAMA
Moinho 01A	20,56	WEIBULL
Transportador 08C	21,87	LOGNORMAL
Moinho 01D	25,17	GAMA
Ventilador 03B	26,49	WEIBULL
Transportador 09	28,33	WEIBULL
Transportador 04B	31,36	WEIBULL

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos dez equipamentos listados, observa-se a presença dos quatro moinhos da granulação, que individualmente não param a planta, mas reduzem a capacidade de produção, além dos transportadores (04B, 08B, 08D e 09) que também não param a planta. Por outro lado, o granulador e o ventilador 03B quando apresentam alguma falha são responsáveis por parar a unidade, merecendo atenção especial.

4.2.2 ELABORAÇÃO DO *JACK-KNIFE DIAGRAM (JKD)* E IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO COM O PIOR DESEMPENHO

Após a identificação dos dez equipamentos com os piores valores de MTBF, calculou- se o tempo médio de restabelecimento (MTTR) e o número de eventos de

cada equipamento para a elaboração do JKD (etapa 3). A tabela 4 mostra os valores de MTTR, o número de eventos e o somatório total de horas desses eventos por equipamento.

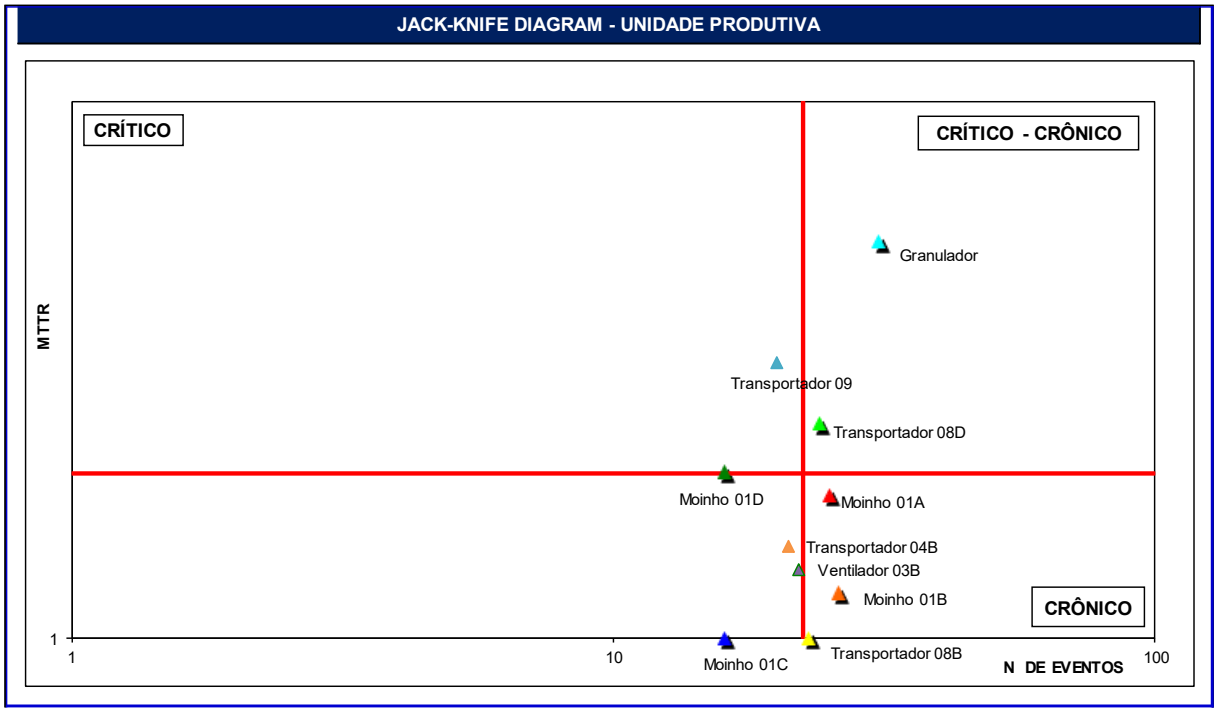
Tabela 4 - N° de eventos, duração e MTTR do top 10 dos piores equipamentos em termos de MTBF.

Equipamentos	N° de Eventos	Duração	MTTR (horas)
Transportador 08B	23	21,95	0,95
Granulador	31	69,83	2,25
Moinho 01C	16	14,44	0,90
Moinho 01B	26	28,48	1,10
Moinho 01A	25	33,53	1,34
Transportador 08C	24	37,23	1,55
Moinho 01D	16	22,49	1,41
Ventilador 03B	22	25,34	1,15
Transportador 09	20	35,18	1,76
Transportador 04B	21	25,36	1,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com estes dados foi possível elaborar o JKD que serve para classificar os equipamentos quanto ao impacto em disponibilidade, confiabilidade e mantenabilidade, conforme mostra a figura 17.

Figura 17 - *Jack-knife Diagram* dos equipamentos com os piores valores de MTBF.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do JKD foi possível identificar o granulador e o transportador 08D como os equipamentos com maior impacto na disponibilidade, pois localizam-se no quadrante superior a direita, possuindo piores valores de MTBF e MTTR, tendo seus eventos classificados como críticos e crônicos. Entretanto, o granulador tem maior impacto do que o transportador, pois está mais à direita e mais acima. Outro equipamento que merece atenção futura é o transportador 09 pois possui um alto MTTR, sendo classificado como crítico, e possui muitos eventos, estando próximo ao limite da classificação como crônico.

Logo, conclui-se que o granulador rotativo é o equipamento com o pior desempenho (etapa 4), apresentando o segundo pior valor de MTBF de toda a unidade produtiva e o pior valor de MTTR entre os dez equipamentos com os menores valores de MTBF. Logo, iniciou-se a implementação do caminho A em busca da melhoria do MTBF do equipamento selecionado, conforme mostrou o fluxograma da figura 8.

4.2.3 ANÁLISE DE CRITICIDADE DO EQUIPAMENTO

A análise da criticidade do equipamento (etapa 5A) considerou as 6 categorias citadas anteriormente: segurança das pessoas e impacto no meio ambiente, MTTR/MTBF, nível de redundância, origem dos componentes (nacional ou importado), mão de obra (própria ou terceira) e qualidade. Essas categorias foram comparadas entre si usando as relações funcionais de Mudge, conforme figura 18 , a fim de verificar qual possui maior importância em relação a outra. Com isso, ao término da comparação, obteve-se o percentual de contribuição de cada categoria.

Figura 18 - Relações funcionais de Mudge para o granulador rotativo

	B		C		D		E		F		Soma	Contribuição
A	B	1	C	3	A	5	A	5	F	1	10	17,5%
	B		C	5	B	5	B	5	B	3	14	24,6%
			C		C	5	C	5	C	3	21	36,8%
					D		E	1	F	5	0	0,0%
							E		F	5	1	1,8%
									F		11	19,3%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as comparações é possível observar que a categoria C, nível de redundância, ficou com maior percentual, isso está relacionado ao granulador rotativo não possuir redundância na linha de produção. Os equipamentos que não possuem redundância na linha de produção, caso venham a parar, toda a linha de produção também para, neste caso a linha de produção é toda a unidade de granulação.

Na figura 19, os percentuais de cada categoria são multiplicados pelo seu respectivo peso, obtendo-se a criticidade de cada categoria que somados resultam na criticidade final do equipamento.

Figura 19 - Resumo da criticidade do granulador rotativo.

Item	Categoria	Contribuição	Peso	Criticidade
A	Segurança das pessoas e impacto no meio ambiente	17,5%	0,5	0,088
B	MTTR/MTBF	24,6%	0,4	0,098
C	Nível de redundância	36,8%	1	0,368
D	Origem	0,0%	0,5	0,000
E	Mão de obra	1,8%	0,5	0,009
F	Qualidade	19,3%	1	0,193
			Nota	0,756
			Criticidade	Crítico

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após atribuído o peso das categorias, além do nível de redundância ficar com peso total, confirmando a observação feita através do diagrama funcional de Mudge, observa-se também a categoria qualidade impactando significativamente na criticidade do equipamento. Isso se explica, pois, qualquer variação de processo no interior do granulador irá afetar diretamente a qualidade final do produto expedido pela unidade.

Por fim, através da figura 19 foi possível concluir que o granulador rotativo é um equipamento crítico, pois possui valor igual ou maior à 0,75. Com isso, o equipamento precisa ter uma estratégia de manutenção baseada em rotinas de manutenção preventiva e/ou preditiva, reforçando ainda mais a necessidade da elaboração dos planos de manutenção no sistema.

4.2.4 FMEA DO EQUIPAMENTO

A elaboração do FMEA do equipamento (etapa 6A) visou ser a mais detalhada possível, visto a alta complexidade do granulador rotativo. Logo, foi preciso realizar a divisão do equipamento em componentes, resultando em 36 componentes para análise, a fim de melhorar a acuracidade da identificação dos potenciais modos de falha.

A elaboração do FMEA aconteceu através das 11 etapas citadas anteriormente e pode ser visto integralmente no Apêndice, figura 36. A partir dele foi possível observar que os modos de falha que apresentaram maior grau de risco (RPN) possuem a detecção das causas classificadas como 5, ou seja, não sendo possível a detecção. Além disso, os onze modos de falha com maior grau de risco, RPN igual a 75, estão relacionados a oito componentes do granulador: coroa/pinhão, rolo de

apoio, pista de rolagem, acoplamento de engrenagem, estator do motor elétrico, caída de saída, tubulão e anel de retenção.

A coroa/pinhão é o primeiro componente com RPN igual à 75, seguindo a ordem do FMEA. Eles possuem como modo de falha a fratura de um dos dentes da engrenagem, resultando em um primeiro momento no aumento da vibração e do ruído para logo após iniciar o processo de fratura dos demais dentes. Isso ocorre, pois, ao fraturar o primeiro dente os demais passam a ser sobrecarregados. A causa da fratura do primeiro dente pode acontecer por três situações: sobrecarga, falha de montagem e impacto excessivo. A ocorrência dessas três causas foi classificada de maneira diferente, sendo a sobrecarga a mais crítica e considerada como ocasional e não regular. Dessa forma, a sobrecarga é o fator preponderante para que o modo de falha seja classificado com grau de risco igual a 75.

O próximo componente é o rolo de apoio do granulador, ele possui a função de sustentar e manter alinhado o tambor rotativo. O rolo de apoio é montado com um eixo passante em seu centro e com um par de mancais nas suas extremidades. Ele possui dois modos dos de falha com RPN igual a 75: fratura do eixo e quebra do rolamento. Ambos possuem como efeito imediato o desalinhamento do tambor rotativo, entretanto o impacto pode ser ainda maior dependendo da condição de operação. A fratura do eixo possui diversas causas, sendo a fadiga e a sobrecarga as duas causas que possuem maior peso no RPN. Já a quebra do rolamento possui como causa principal também a sobrecarga. Dessa forma, o rolo de apoio requer uma atenção especial, visto que quando ocorre a falha tanto do eixo quanto do rolamento o tempo de parada é muito elevado, acima de 5 horas, a depender da gravidade da falha e se o equipamento parou cheio de produto no seu interior.

A pista de rolagem é o terceiro componente com alto grau de RPN, onde ela tem como função permitir o contato do tambor com os rolos de apoio. O principal modo de falha é a fratura da pista que gera perda do movimento do tambor, ou seja, o equipamento para imediatamente. A severidade do efeito é muito alta, pois o tempo de reparo médio ultrapassa às 5 horas. A causa do modo de falha é novamente a sobrecarga.

O quarto componente é o acoplamento de engrenagem, posicionado entre a saída do redutor e o pinhão. Ele também possui como potencial modo de falha a fratura do acoplamento, que geralmente ocorre pela fratura dos dentes da

engrenagem. Este modo de falha gera a perda de movimento do tambor e um tempo de parada médio de também 5 horas, possuindo duas causas principais: reversão no sentido de rotação do motor e sobrecarga do acoplamento.

O próximo componente é o estator do motor elétrico que tem a função de promover o campo magnético. Ele possui dois modos de falha, sendo a perda de isolação a que tem RPN igual à 75, ocasionando a queima do motor. O motor é de 300 CV e 4 polos e a sua substituição também possui um tempo médio de reparo superior a 5 horas, visto o tamanho do motor e a posição do granulador na planta. A principal causa para a perda de isolação é a contaminação que pode ocasionar o bloqueio do ventilador de refrigeração do motor e com isso aumentar sua temperatura, que por consequência deteriora o isolamento do motor.

O sexto componente do granulador com alto valor de RPN é a caída de saída, ela transporta o produto granulado para o secador, que é outro tambor rotativo que tem a função de remover temperatura e umidade do produto. A caída de saída é revestida de borracha, a mesma utilizada em correias transportadoras. Ela possui dois modos de falha associados com a borracha, são eles: desgaste e incêndio da borracha. O primeiro modo de falha tem como efeito a diminuição da alimentação do secador e a contaminação da unidade, pois o desgaste da borracha pode ocasionar furos que vão ocasionar fuga de material. A causa mais frequente do desgaste é a abrasividade do material que ao longo do tempo vai diminuindo a espessura da borracha até furar a mesma. Já o segundo modo de falha causa danos relacionados a saúde e segurança, necessitando a parada emergencial de toda a unidade. A principal causa é a falha do ventilador de exaustão da fornalha a cavaco, pois o secador recebe calor da fornalha a cavaco que por sua vez possui um exaustor para tiragem de ar. A falha nesse ventilador faz com que a temperatura fique muito elevada e tendo o risco potencial de incêndio.

O sétimo componente é o que chamamos de tubulão, na verdade é um tubo que passa no interior do tambor onde está fixado o suporte do espargidor. Ele possui uma função estrutural para o tambor, interligando a parte frontal com a traseira. O potencial modo de falha é a fratura do tubulão, que ao falhar resulta na parada do equipamento devido à quebra da estrutura do espargidor e do espargidor, parando assim a injeção dos fluidos granulantes. Este potencial modo de falha possui duas

possíveis causas: abrasão e corrosão química. Tanto a abrasão quanto a corrosão química acontecem pelo contato do produto que está sendo granulado com o tubo.

Por fim, o oitavo e último componente com RPN igual a 75 é o anel de retenção, cuja função é manter o produto no interior do granulador o tempo necessário para que ocorra a correta granulação dos grãos, mantendo o nível de produto no interior em valores aceitáveis. O nível de produto e o tempo de retenção são fatores que impactam diretamente na qualidade final do produto. O principal modo de falha do anel de retenção é o desgaste do material, que faz com que o tempo de residência e o nível de produto fiquem menores do que o necessário. A causa do desgaste do material é a abrasividade que ocorre com o produto já granulado.

A identificação dos componentes e dos seus respectivos modos de falha através do FMEA são fundamentais para a definição da melhor estratégia de manutenção, pois auxiliam no direcionamento dos itens que necessitam de manutenção preventiva e/ou preditiva.

4.2.5 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO

Baseado na análise de criticidade do equipamento foi definido o nível da estratégia de manutenção, ou seja, a quão robusta ela deve ser para atender a criticidade que ele possui. Com isso, tornou-se necessário a elaboração de planos de manutenção preventivos e/ou preditivos. Além disso, visto o alto impacto do equipamento na unidade produtiva, elaborou-se também planos de inspeção sensitiva, a fim de identificar potenciais anomalias o mais rápido possível.

A partir do FMEA, priorizou-se os componentes e os respectivos modos de falha do granulador para elaboração dos planos de manutenção. As figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 ilustram o conteúdo dos planos criados no SAP.

Figura 20 - Plano de inspeção sensitiva de planta parada.

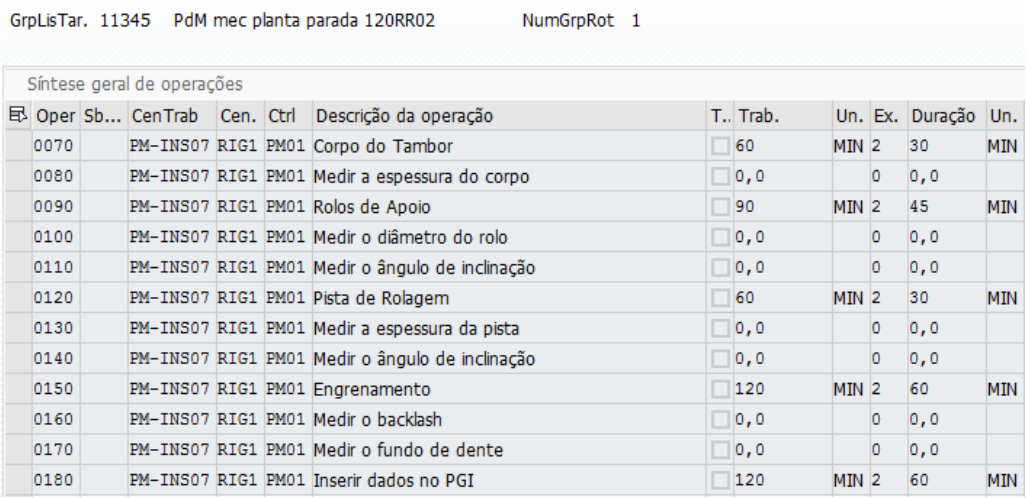
GrpLisTar. 7888 Insp. sens. mec. planta parada 120RR02 NumGrpRot 1

Síntese geral de operações

Oper	Sb...	CenTrab	Cen.	Ctrl	Descrição da operação	T..	Trab.	Un.	Ex.	Duração	Un.
0010		PM-INS07	RIG1	PM01	Organizar materiais e ferramentas		10	MIN	2	5	MIN
0020		PM-INS07	RIG1	PM01	Bloquear equipamento		20	MIN	2	10	MIN
0030		PM-INS07	RIG1	PM01	Liberar a permissão de trabalho		40	MIN	2	20	MIN
0040		PM-INS07	RIG1	PM01	INSP. MENSAL GRANULADOR		0	MIN	0	0	MIN
0050		PM-INS07	RIG1	PM01	Avaliar coroa	✓	10	MIN	2	5	MIN
0060		PM-INS07	RIG1	PM01	Checar contato de rolos e pista	✓	20	MIN	2	10	MIN
0070		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar estado dos calços da pista	✓	20	MIN	2	10	MIN
0080		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar rolos de apoio saída		20	MIN	2	10	MIN
0090		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar rolos de escora		20	MIN	2	10	MIN
0100		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar fixação tubulações espargidor		40	MIN	2	20	MIN
0110		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar desgaste/vazamento tubulação		40	MIN	2	20	MIN
0120		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar fixação das bengalas		40	MIN	2	20	MIN
0121		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar Martelos:		0	MIN	2	0	MIN
0122		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar condição		20	MIN	2	10	MIN
0123		PM-INS07	RIG1	PM01	Ver. estrutura:amassada, furada, trincas		20	MIN	2	10	MIN
0124		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar flanges		10	MIN	2	5	MIN
0125		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar parafusos		10	MIN	2	5	MIN
0130		PM-INS07	RIG1	PM01	INSP. BIM. GRANULADOR		0,0		0	0,0	
0140		PM-INS07	RIG1	PM01	Pista superior (entrada)	✓	40	MIN	2	20	MIN
0150		PM-INS07	RIG1	PM01	Pista inferior (saída)	✓	40	MIN	2	20	MIN
0160		PM-INS07	RIG1	PM01	Rolos de apoio pista 1	✓	40	MIN	2	20	MIN
0170		PM-INS07	RIG1	PM01	Rolos de apoio pista 2	✓	40	MIN	2	20	MIN
0180		PM-INS07	RIG1	PM01	INSP. TRIM. GRANULADOR		0,0		0	0,0	
0190		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar anel retentor	✓	30	MIN	2	15	MIN
0200		PM-INS07	RIG1	PM01	Verificar revestimento interno	✓	60	MIN	2	30	MIN
0210		PM-INS07	RIG1	PM01	Avaliar coroa e pinhão	✓	360	MIN	2	180	MIN
0220		PM-INS07	RIG1	PM01	Revisar acoplamento	✓	60	MIN	2	30	MIN
0230		PM-INS07	RIG1	PM01	INSP. ANUAL GRANULADOR		0,0		0	0,0	
0240		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir espessura da borracha de caída		40	MIN	2	20	MIN
0250		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir espessura das chapas anel retentor		40	MIN	2	20	MIN
0260		PM-INS07	RIG1	PM01	Fazer housekeeping		10	MIN	2	5	MIN
0270		PM-INS07	RIG1	PM01	Desbloquear equipamento		20	MIN	2	10	MIN

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Plano de manutenção preditiva mecânica de planta parada.



GrpLisTar. 11345 PdM mec planta parada 120RR02 NumGrpRot 1

Síntese geral de operações

Oper	Sb...	CenTrab	Cen.	Ctrl	Descrição da operação	T..	Trab.	Un.	Ex.	Duração	Un.
0070		PM-INS07	RIG1	PM01	Corpo do Tambor		60	MIN	2	30	MIN
0080		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir a espessura do corpo		0,0		0	0,0	
0090		PM-INS07	RIG1	PM01	Rolos de Apoio		90	MIN	2	45	MIN
0100		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir o diâmetro do rolo		0,0		0	0,0	
0110		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir o ângulo de inclinação		0,0		0	0,0	
0120		PM-INS07	RIG1	PM01	Pista de Rolagem		60	MIN	2	30	MIN
0130		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir a espessura da pista		0,0		0	0,0	
0140		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir o ângulo de inclinação		0,0		0	0,0	
0150		PM-INS07	RIG1	PM01	Engrenamento		120	MIN	2	60	MIN
0160		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir o backlash		0,0		0	0,0	
0170		PM-INS07	RIG1	PM01	Medir o fundo de dente		0,0		0	0,0	
0180		PM-INS07	RIG1	PM01	Inserir dados no PGI		120	MIN	2	60	MIN

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Plano de manutenção preventiva mecânica de planta parada.

GrpLisTar. 12688 Preventiva mec planta parada NumGrpRot 1

Síntese geral de operações

Oper	Sb...	CenTrab	Cen.	Ctrl	Descrição da operação	T..	Trab.	Un.	Ex.	Duração	Un.
0010		PM-MEC2	RIG1	PM01	Organizar materiais e ferramentas	☑	20	MIN	2	10	MIN
0020		PM-MEC2	RIG1	PM01	Desenergizar equipamento	☑	20	MIN	2	10	MIN
0030		PM-MEC2	RIG1	PM01	Liberar permissão de trabalo	☐	40	MIN	2	20	MIN
0040		PM-MEC2	RIG1	PM01	PLANO PREVENTIVA GRANULADOR	☐	0,0		0	0,0	
0050		PM-MEC2	RIG1	PM01	Espargidor para Água	☐	400	MIN	2	200	MIN
0060		PM-MEC2	RIG1	PM01	Substituir Espagidor	☐	0,0		0	0,0	
0070		PM-MEC2	RIG1	PM01	Substituir elementos de fixação	☐	0,0		0	0,0	
0080		PM-MEC2	RIG1	PM01	Espargidor para Vapor	☐	400	MIN	2	200	MIN
0090		PM-MEC2	RIG1	PM01	Substituir Espagidor	☐	0,0		0	0,0	
0100		PM-MEC2	RIG1	PM01	Substituir elementos de fixação	☐	0,0		0	0,0	
0110		PM-MEC2	RIG1	PM01	Martelos	☐	160	MIN	2	80	MIN
0120		PM-MEC2	RIG1	PM01	Ajustar elementos de fixação	☐	0,0		0	0,0	
0130		PM-MEC2	RIG1	PM01	Desbloquear equipamento	☐	10	MIN	1	10	MIN
0140		PM-MEC2	RIG1	PM01	Encerrar Permissão de Trabalho	☐	10	MIN	1	10	MIN

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Plano de manutenção preditiva elétrica de planta parada.

GrpLisTar. 11267 YPS - PdM Elet planta parada 120RR02 RI NumGrpRot 1

Síntese geral de operações

Oper	Sb...	CenTrab	Cen.	Ctrl	Descrição da operação	T..	Trab.	Un.	Ex.	Duração	Un.
0010		PM-INS11	RIG1	PM01	Verificar materiais e ferramentas	☐	0,0		0	0,0	
0020		PM-INS11	RIG1	PM01	Bloquear equipamento	☐	0,0		0	0,0	
0040		PM-INS11	RIG1	PM01	PdM 4M 0120-RR02	☑	120	MIN	2	60	MIN
0050		PM-INS11	RIG1	PM01	Medir resistência de isolamento	☐	0,0		0	0,0	
0060		PM-INS11	RIG1	PM01	Fase contra terra	☐	0,0		0	0,0	
0070		PM-INS11	RIG1	PM01	Entre fases	☐	0,0		0	0,0	
0080		PM-INS11	RIG1	PM01	Desbloquear equipamento	☐	0,0		0	0,0	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Plano de manutenção preventiva elétrica planta parada.

GrpLisTar. 8177 Preventiva elet. planta parada 120RR02 NumGrpRot 1

Síntese geral de operações

Oper	Sb...	CenTrab	Cen.	Ctrl	Descrição da operação	T..	Trab.	Un.	Ex.	Duração	Un.
0010		PM-ELE1	RIG1	PM01	Organizar materiais e ferramentas	☐	20	MIN	2	10	MIN
0020		PM-ELE1	RIG1	PM01	Realizar bloqueio	☑	20	MIN	2	10	MIN
0040		PM-ELE1	RIG1	PM01	PM 3M MOTOR E BOTOEIRA	☑	0,0		0	0,0	
0050		PM-ELE1	RIG1	PM01	Raspar material encrostado na carcaça	☐	10	MIN	2	5	MIN
0060		PM-ELE1	RIG1	PM01	Abrir tampa defletora	☐	8	MIN	2	4	MIN
0070		PM-ELE1	RIG1	PM01	Limpar parte interna da tampa	☐	6	MIN	2	3	MIN
0080		PM-ELE1	RIG1	PM01	Limpar ventoinha	☐	6	MIN	2	3	MIN
0090		PM-ELE1	RIG1	PM01	Aplicar graxar parafusos da tampa	☐	6	MIN	2	3	MIN
0100		PM-ELE1	RIG1	PM01	Fechar tampa defletora	☐	6	MIN	2	3	MIN
0110		PM-ELE1	RIG1	PM01	Reapertar parafusos de fixação do motor	☐	8	MIN	2	4	MIN
0120		PM-ELE1	RIG1	PM01	Abrir caixa de ligação	☐	6	MIN	2	3	MIN
0130		PM-ELE1	RIG1	PM01	Soltar conexões	☐	8	MIN	2	4	MIN
0140		PM-ELE1	RIG1	PM01	Efetuar limpeza da área interna da caixa	☐	10	MIN	2	5	MIN
0150		PM-ELE1	RIG1	PM01	Reparar isolação dos cabos	☐	20	MIN	2	10	MIN
0160		PM-ELE1	RIG1	PM01	Reconectar cabos	☐	16	MIN	2	8	MIN
0170		PM-ELE1	RIG1	PM01	Vedar caixa e corrugado com silicone	☐	6	MIN	2	3	MIN
0180		PM-ELE1	RIG1	PM01	Fechar caixa ligação e lubrificar paraf.	☐	4	MIN	2	2	MIN

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Continuação do plano de manutenção preventiva elétrica de planta parada.

0190		PM-ELE1	RIG1	PM01	PM 3M Botoeira	☑	10	MIN	0	0	MIN
0200		PM-ELE1	RIG1	PM01	Abrir caixa de Botoeira	☐	4	MIN	2	2	MIN
0210		PM-ELE1	RIG1	PM01	Reapertar/refazer conexões elétricas	☐	10	MIN	2	5	MIN
0220		PM-ELE1	RIG1	PM01	Revisar/Limpar blocos de contato	☐	4	MIN	2	2	MIN
0230		PM-ELE1	RIG1	PM01	Revisar capa de proteção botão	☐	4	MIN	2	2	MIN
0240		PM-ELE1	RIG1	PM01	Realizar limpeza interna na botoeira	☐	4	MIN	2	2	MIN
0250		PM-ELE1	RIG1	PM01	Fechar caixa de botoeira	☐	4	MIN	2	2	MIN
0260		PM-ELE1	RIG1	PM01	Verificar/Identificar botoeira	☐	4	MIN	2	2	MIN
0270		PM-ELE1	RIG1	PM01	Instalar saco de proteção da botoeira	☐	4	MIN	2	2	MIN
0280		PM-ELE1	RIG1	PM01	Realizar limpeza no local	☐	4	MIN	2	2	MIN
0290		PM-ELE1	RIG1	PM01	Desbloquear equipamento Perigo: Energia	☑	4	MIN	2	2	MIN

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os planos de manutenção elaborados são todos de planta parada, ou seja, precisam do equipamento parado para a intervenção. Além disso, eles contemplam a inspeção do equipamento e a manutenção preventiva e preditiva, tanto para a disciplina mecânica quanto para a disciplina elétrica. No padrão do plano no SAP constam as etapas do que fazer e ao lado a duração do trabalho em minutos. Essa duração é calculada através da multiplicação do número de colaboradores na etapa da atividade com a duração da etapa em minutos.

Com a estratégia de manutenção definida (etapa 7A), o próximo passo é a avaliação da eficácia da estratégia em relação a melhoria do MTBF. Entretanto, como o presente estudo visa a melhoria tanto do MTBF quanto do MTTR, realizou-se a implementação do caminho B que buscou a redução dos desperdícios ao longo do fluxo da atividade de manutenção. Após a implementação do caminho B é realizada então a avaliação da eficácia do método integrado, contemplando ambos os caminhos.

4.2.6 APLICAÇÃO DO M-VSM PARA O MAPEAMENTO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DO GRANULADOR ROTATIVO E APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DO *LEAN* PARA ELIMINAÇÃO DOS DESPERDÍCIOS

A aplicação do M-VSM (etapa 5B) buscou o mapeamento das perdas ao longo da atividade de manutenção do granulador rotativo, desde a chegada da informação da falha no equipamento, passando pela organização da atividade e chegando até a execução dela, visando a redução do MTTR do equipamento. A aplicação do M-

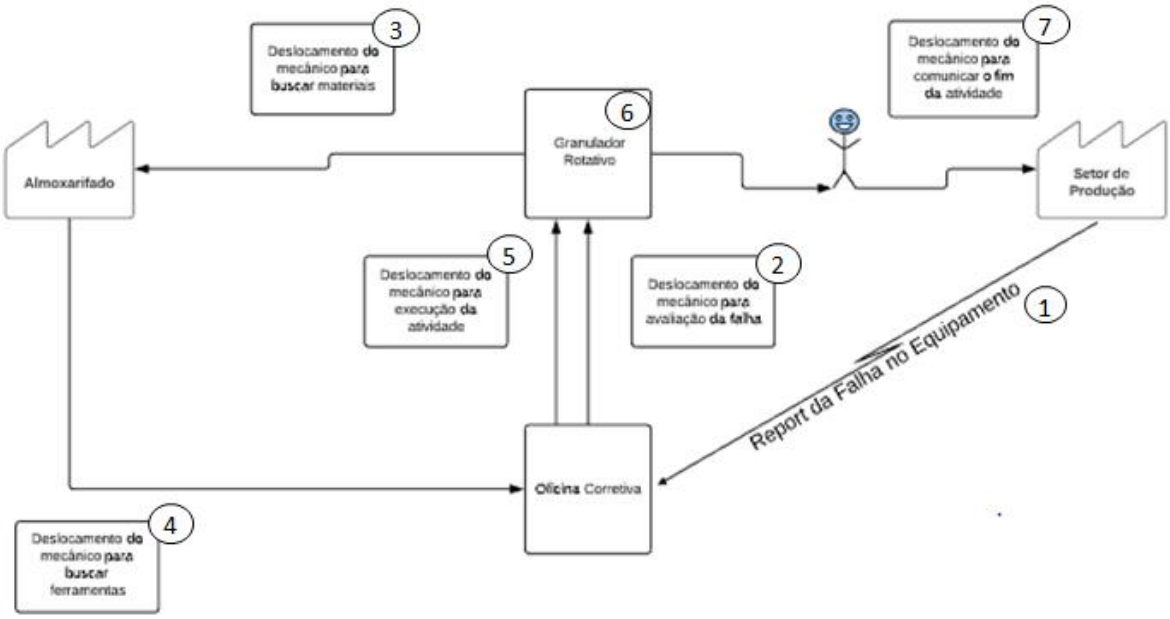
VSM teve seu início com a criação do mapa do fluxo de valor (mapa do estado atual). O mapa do fluxo de valor foi desenvolvido para as atividades corretivas, a fim de observar os desperdícios e atuar nas fontes. Pois, a análise para as atividades de manutenção preventivas e/ou preditivas no equipamento teriam um impacto menor, visto que ocorrem sempre em paradas programadas e, por isso, já possuem um fluxo com maior organização e detalhamento. Com isso, o maior ganho poderá ser observado na análise das atividades corretivas no granulador, onde essas atividades são geralmente críticas e de alta duração. Vale lembrar que o granulador rotativo apresentou no período analisado, de janeiro de 2017 a abril de 2018, o maior valor de MTTR, igual a 2,25 horas.

Na construção do mapa do estado atual foram listadas as 7 etapas necessárias para a execução da manutenção corretiva no granulador rotativo, independentemente da falha apresentada; são elas:

- Etapa 1: comunicação entre a equipe de produção e manutenção, relatando a falha no equipamento via telefone;
- Etapa 2: deslocamento do time de manutenção da oficina corretiva para o equipamento, a fim de entender e identificar a falha, além de analisar os materiais e ferramentas necessários para a execução da atividade;
- Etapa 3: deslocamento do time de manutenção para buscar os materiais no almoxarifado;
- Etapa 4: deslocamento do time de manutenção para buscar as ferramentas na oficina corretiva;
- Etapa 5: deslocamento do time de manutenção até o equipamento para iniciar a atividade;
- Etapa 6: execução da atividade de manutenção;
- Etapa 7: deslocamento do time de manutenção para a sala da produção, a fim de comunicar o término do serviço.

A figura 26 ilustra o mapa do estado atual com as etapas citadas.

Figura 26 - Mapa do estado atual das atividades corretivas no granulador rotativo.



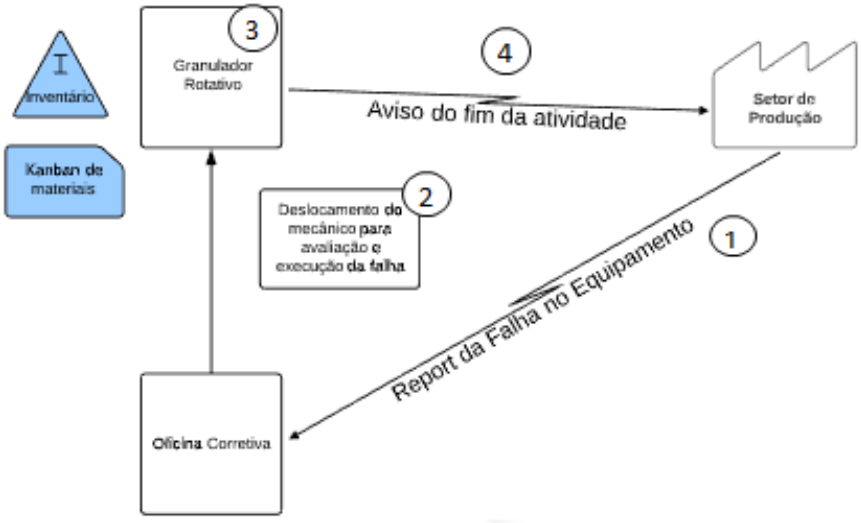
Fonte: Elaborado pelo autor.

No mapa do estado atual é interessante observar que a agregação de valor por parte da equipe de manutenção acontece somente na etapa 6. O restante do tempo é considerado como desperdício ou incidental. O valor agregado acontece quando o tempo é utilizado para agregar valor para a organização, ou seja, quando há transformação do produto. Já o tempo incidental não está gerando valor para a empresa, mas é um tempo necessário para que a atividade agregadora aconteça na sequência. Por fim, o tempo classificado como desperdício é aquele em que atividade não precisava existir. O grande objetivo das empresas deve ser sempre reduzir o tempo incidental ao máximo e eliminar os desperdícios.

Pinto (2013) sugere a separação do tempo da atividade em dois fatores: tempo de espera e tempo de intervenção; ou seja, fazendo uma analogia com a agregação de valor, o tempo de espera é a parcela do tempo que acontece o desperdício ou o tempo incidental, já o tempo de intervenção é a parcela em que ocorre a agregação de valor. Neste caso, deve-se buscar ao máximo a redução do tempo de espera.

Dessa forma, a figura 27 mostra o mapa do estado futuro. Com ele busca-se eliminar as fontes dos desperdícios e potencializar o tempo dos colaboradores realizando atividades que agreguem valor.

Figura 27 - Mapa do estado futuro das atividades corretivas no granulador rotativo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No mapa do estado futuro reduziu-se as etapas de 7 para 4, são elas:

- Etapa 1: comunicação entre a equipe de produção e manutenção, relatando a falha no equipamento via telefone ou rádio de comunicação;
- Etapa 2: deslocamento do time de manutenção da oficina corretiva para o equipamento, a fim de executar o reparo necessário;
- Etapa 3: execução da atividade de manutenção;
- Etapa 4: comunicação entre a equipe de manutenção e produção via rádio de comunicação, relatando o término do serviço.

A redução das etapas foi baseada na aplicação dos conceitos e das ferramentas do *Lean Manufacturing* (etapa 6B).

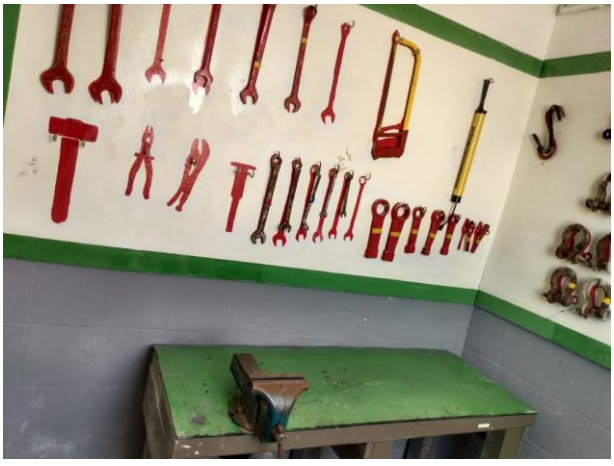
No mapa do estado futuro está ilustrado como Kanban de Materiais e Inventário o posto avançado que foi criado, contendo os materiais e as ferramentas necessárias para a execução das atividades. Através do posto avançado, eliminou-se a necessidade de deslocamento da equipe de manutenção ao almoxarifado e à oficina corretiva para a preparação da atividade. A construção do posto avançado iniciou com a implementação do 5S em uma sala ao lado do equipamento, a fim de evitar grandes deslocamentos. Além disso, para que o posto avançado fosse eficaz foi necessário realizar uma análise do banco de dados, avaliando quais materiais e

ferramentas foram utilizados nos últimos reparos do granulador rotativo. Esses materiais e ferramentas foram então disponibilizados no posto avançado. O controle desses materiais e ferramentas no posto avançado foi realizado adaptando a metodologia do kanban e utilizando conceitos de gestão à vista, onde ao pegar qualquer material e/ou ferramenta o colaborador precisa colocar uma ficha com o nome do que foi retirado no quadro de controle ao lado de seu nome. O quadro de controle possui o nome de todos os colaboradores da manutenção, tanto da equipe corretiva quando preventiva, a fim de facilitar a localização de uma ferramenta.

Em relação ao controle dos níveis de estoque e abastecimento dos materiais, o trabalho foi conduzido em conjunto ao setor do almoxarifado. Os níveis de estoque são controlados através de placas posicionadas pelo setor do almoxarifado entre os materiais, a fim de identificar quando determinado material está em seu estoque de segurança. Com isso, o colaborador coloca a placa no quadro de controle, sinalizando para a equipe do almoxarifado. A equipe do almoxarifado passa na sala do posto avançado uma vez a cada dois dias, a fim de verificar a presença de alguma placa e reabastecer o posto com os materiais.

O posto avançado pode ser visto nas figuras abaixo, onde as figuras 28, 29, 30 e 31 ilustram o quadro de ferramentas e bancada para manutenção, inventário de materiais de pequeno e grande porte e quadro de controle e abastecimento dos materiais e ferramentas, respectivamente.

Figura 28 - Quadro de ferramentas e bancada de trabalho para manutenção no granulador rotativo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Inventário de materiais de pequeno porte para manutenção no granulador rotativo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Inventário de materiais de grande porte para manutenção no granulador rotativo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Sistema de controle de ferramentas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.7 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIAS DAS AÇÕES

Com ambos os caminhos implementados no final do ano de 2018, o granulador rotativo iniciou o ano de 2019 com a estratégia de manutenção definida, assim como o estado futuro do M-VSM implementado, que passou a ser o novo estado atual. Dessa forma, a fim de avaliar a eficácia do método integrado (etapa 8), repetiu-se a análise do MTBF e MTTR para o equipamento. A tabela 5 a seguir mostra o comparativo entre os dados do granulador antes e depois das ações implementadas:

Tabela 5 - Comparativo entre o MTTR e MTBF antes e depois da implementação das ações do estudo.

Itens	2017/2018	2019
N° de Eventos	31	28
Duração Total (horas)	69,83	51
MTTR (horas)	2,25	1,8
MTBF (dias)	17,91	11,48

Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, observou-se uma melhora de 20% em relação ao MTTR, passando de 2,25h para 1,8h. Essa redução de 0,45h na média representa no ano de 2019 um ganho em horas disponíveis para operação de 12h. Considerando que a planta produz em média 90ton/h, este aumento no tempo da planta disponível para operação possibilita um aumento de volume de aproximadamente 1.100 toneladas. Além disso, com a redução do tempo médio de restabelecimento, a equipe de manutenção ganha essas mesmas horas a mais no ano para execução de outras atividades.

Entretanto, ao analisarmos o MTBF do equipamento, notou-se que houve uma diminuição do tempo médio entre falhas, ou seja, a confiabilidade do equipamento tornou-se menor. Ao analisar separadamente os eventos do granulador rotativo no ano de 2019, a fim de entender o motivo da menor confiabilidade, observou-se que 13 dos 28 eventos (46%) foram associados à problemas na borracha interna do granulador. No estudo do FMEA a borracha interna foi o primeiro item da análise, entretanto a causa principal do problema da borracha não foi considerada, que é a utilização do material fora de especificação. A utilização do material incorreto ocorreu no ano de 2017, quando foram trocadas as borrachas na parada anual

programada. No FMEA foi considerada a ruptura como um dos potenciais modos de falha, mas esta causa, infelizmente, não foi considerada e, com isso, acabou não sendo contemplada na estratégia de manutenção.

Ao simular a mesma tabela comparativa, retirando as falhas da borracha do granulador, os valores de MTTR e MTBF foram de 1,9 horas e 21,6 dias, respectivamente, conforme visto na tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Comparativo entre o MTTR e MTBF antes e depois da implementação das ações do estudo – expurgando os eventos do material utilizado fora da especificação.

Itens	2017/2018	2019
N° de Eventos	31	15
Duração Total (horas)	69,83	28,7
MTTR (horas)	2,25	1,9
MTBF (dias)	17,91	21,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a melhoria do MTTR seria de 15,5% e a do MTBF de 20,6%, confirmando a eficácia do modelo.

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A escolha do MTBF como indicador para seleção dos dez equipamentos no modelo teórico proposto (etapa 2) se deu devido à baixa confiabilidade encontrada na unidade produtiva (etapa 1), onde o MTBF da unidade no período analisado era de 14,32 horas. Para a unidade produtiva operar com uma confiabilidade de 80% se faz necessário uma intervenção, em média, a cada 5 horas. Além disso, pôde-se observar que a distribuição que melhor representou os dados da unidade produtiva foi a lognormal. Fogliatto e Ribeiro (2011) explicam em seu livro que essa distribuição é geralmente utilizada na modelagem de unidades reparáveis, sendo neste caso esperado que a probabilidade de completar uma ação de reparo aumente com o passar do tempo. Este comportamento pôde ser observado por meio da Figura 16, onde a curva da taxa de falha é crescente até 10,32 horas, e após isso a curva passa a ser decrescente, sendo assim fundamental aumentar o MTBF da unidade produtiva.

Somado a estes dados, a unidade produtiva em estudo apresenta uma rampa de partida da fábrica muito elevada, ou seja, sempre que há algum evento de falha que pare a unidade produtiva. Além do tempo de restabelecimento do equipamento, há um tempo elevado para colocar todos os equipamentos em funcionamento, o que reforça a importância do MTBF. Os autores Sawhney, Kannan e Li (2009) utilizam o indicador Tempo Médio para Produção (MTTY) para medir este tempo em que o equipamento já reparado necessita para voltar a produzir na nominal. Esta rampa elevada se dá devido a dependência de alguns equipamentos já estarem ligados para outros poderem entrar em funcionamento. Logo, mesmo melhorando o MTTR dos equipamentos, há esta parcela de tempo para a unidade voltar a produzir (MTTY), o que reforça o MTBF como prioridade neste caso específico.

Entretanto, em situações onde o MTTY da empresa é muito insignificante, o MTTR pode passar a ter maior impacto em termos gerais do que o MTBF. Nestes casos, ou por outros motivos que façam o MTTR ser prioritário em relação ao MTBF, a etapa 2 do modelo integrado deve ser realizada em relação ao MTTR, ao invés do MTBF.

A partir da etapa 2 do modelo teórico proposto, construiu-se o diagrama *Jack-knife* (JKD) – etapa 3, relacionando os indicadores MTBF e MTTR a fim de classificar

os equipamentos em crônicos, críticos ou críticos e crônicos. Knights (2004) e Seecharan (2018) explicam em seus estudos as vantagens em utilizar o diagrama *Jack-knife*, principalmente quando comparado ao Histograma de Pareto. O diagrama permite a avaliação de dois critérios simultaneamente por se tratar de um método multivariado, que neste caso foram número de eventos de falha (MTBF) e MTTR, além de permitir uma melhor representação visual, classificando os equipamentos em quadrantes.

A identificação do equipamento com pior desempenho foi realizada com base no *Jack-knife diagram*, isso porque se identificarmos matematicamente pela equação 1 o equipamento com pior disponibilidade, tem-se o risco de não ser considerado o indicador prioritário para a organização. Ou seja, pode haver alguns casos em que o equipamento apresente melhor disponibilidade do que outro e mesmo assim tenha maior impacto para a unidade produtiva. Dessa forma, por meio do *Jack-knife diagram* é possível definir visualmente qual o equipamento deve ser priorizado para análise, servindo como ferramenta para tomada de decisão dos gestores.

Após a definição do equipamento com pior desempenho, o modelo integrado sugeriu dois caminhos, sendo o primeiro deles (caminho A) voltado para a melhoria do MTBF. Uma das ferramentas propostas neste caminho foi o FMEA, visando identificar os principais modos de falha e os seus respectivos componentes, a fim de que sejam contemplados na revisão da estratégia de manutenção. Em alguns casos, o FMEA pode ser substituído ou utilizado em conjunto com algumas ferramentas, a depender do objetivo que está sendo aplicado e da disponibilidade de histórico de dados. Algumas dessas ferramentas são: Análise de Criticidade, Modos e Efeitos de Falhas (FMECA – *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) que é uma variação do FMEA, e Análise da Árvore de Falha (FTA – *Fault Tree Analysis*).

A grande diferença do FMECA para o FMEA é que o primeiro método é mais quantitativo, utilizado para classificar os modos e efeitos de falhas críticas levando em consideração suas probabilidades de ocorrência (HERPICH; FOGLIATTO, 2013). Segundo Pinto (2013), na análise FMECA todos os modos de falha são identificados e avaliados de acordo com a sua criticidade, que depois é traduzida em risco, caso o risco não seja aceitável é necessário tomar medidas corretivas. Por se tratar de um método mais quantitativo há a dependência de mais dados para a sua aplicação, tais como probabilidade de falha de cada item (F(t)), taxa do modo de

falhas (MF(t)) e probabilidade de perda (Pp(t)); pois estes parâmetros são necessários para calcular a criticidade (Cr) de cada potencial modo de falha, conforme mostra a equação 10 (PINTO, 2013). Sendo assim, havendo disponibilidade de dados o FMECA pode substituir o FMEA na análise de equipamentos e instalações.

$$Cr = F(t) \times MF(t) \times Pp(t) \quad \text{(Equação 10)}$$

Por outro lado, não é recomendável que o FTA substitua o FMEA, mas que seja utilizado em conjunto. O FTA é um diagrama lógico que representa combinações de falhas entre os componentes que acarretam uma falha do sistema como um todo. Para isso, o método exige que sejam especificadas as dependências entre os componentes do sistema (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Através da análise das dependências, o FTA permite a identificação de inúmeras oportunidades de melhoria dos sistemas (PINTO, 2013).

Da mesma forma que para o caminho A, onde o FMEA pode ser substituído por outras ferramentas, a depender da complexidade da análise desejada e das informações disponíveis, o M-VSM recomendando no caminho B também pode ser substituído ou utilizado em conjunto com outras ferramentas. Algumas dessas ferramentas que podem ser utilizadas são: método A3, mapas de atividades, diagrama de processo e outras ferramentas similares que busquem o mapeamento das atividades ao longo do processo, incluindo medição dos tempos.

O método A3 para resolução de problemas é um método mais genérico, que pode ser aplicado para praticamente todos os tipos de problemas. Ele é um método que facilita a comunicação e agiliza o pensamento em grupo, podendo ser utilizado juntamente ao M-VSM ou, em alguns casos, substituindo o mesmo. O Sistema Toyota de Produção (TPS) desenvolveu vários métodos A3, mas praticamente todos possuem alguns campos básicos, como por exemplo o estado inicial (*as is*) e o estado futuro (*to be*). Se o método A3 substituir o M-VSM, ele precisa ser utilizado em conjunto com outros métodos, tais como: diagrama de Ishikawa, cinco porquês (5W) e/ou gráfico de Gantt (PINTO, 2013).

No modelo proposto, o M-VSM foi sugerido pois o fluxo da atividade de manutenção, contemplando o fluxo do material e da informação, era muito

complexo. Essa complexidade existe devido ao tamanho da unidade produtiva, da relação entre as equipes (produção, manutenção e almoxarifado) e da variabilidade de peças que o equipamento em análise utiliza. Através do M-VSM foi possível identificar os desperdícios de forma detalhada, o que tornou possível a eliminação de muitos deles de forma completa.

A utilização das ferramentas do *Lean Manufacturing*, tais como: kanban de materiais, gestão à vista, 5S e rotas de abastecimento, foram fundamentais na eliminação dos desperdícios. No estudo do granulador rotativo, identificou-se que a equipe de manutenção precisava se deslocar inúmeras vezes, ou para buscar materiais ou para buscar ferramentas e documentações necessárias para o início da atividade. Dessa forma, a aproximação dos materiais através da construção de um posto avançado próximo ao equipamento teve papel crucial na redução do MTTR. Mas, para que o posto avançado fosse eficaz e estivesse abastecido com os materiais, se fez preciso a implementação do 5S da área, além do controle dos materiais com kanban e gestão a vista, que permitiu ao time do almoxarifado a implementação de rotas de abastecimento.

Essas ferramentas do *Lean Manufacturing* citadas foram utilizadas devido aos desperdícios identificados pelo M-VSM. Ao replicar o método integrado proposto em outros equipamentos e organizações, o mapeamento dos desperdícios levará a uma necessidade diferente de ferramentas do *Lean Manufacturing*. Dessa forma, é fundamental ao aplicar o modelo integrado que a equipe responsável pela análise tenha conhecimento dos princípios e ferramentas do *Lean*, a fim de que sejam escolhidas as ferramentas certas para cada aplicação.

Por fim, ao analisar os valores obtidos de MTBF e MTTR para o granulador rotativo após as ações de melhoria implementadas, expurgando a falha na execução do FMEA, e relacionando ao MTTF pela equação 2, observa-se que o MTBF é composto 0,3% pelo MTTR e 99,7% pelo MTTF. Com isso, é possível concluir que para o granulador rotativo os maiores ganhos estão associados com o aumento do MTTF, ou seja, estão associados com o espaçamento das falhas. No modelo integrado proposto, o aumento da vida útil do ativo e, consequentemente, o espaçamento das falhas, é obtido por meio de uma estratégia de manutenção mais assertiva.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho atingiu o objetivo que era de propor um modelo integrado para melhoria da disponibilidade dos equipamentos na gestão da manutenção, relacionando os indicadores MTBF e MTTR. Além disso, o modelo foi validado por meio de um estudo de caso em uma indústria de fertilizantes.

O modelo integrado auxiliou na tomada de decisão gerencial em relação a priorização dos recursos disponíveis, tanto na identificação do equipamento com o pior desempenho a ser estudado, quanto na seleção do indicador a ser priorizado para classificação dos equipamentos (MTBF e/ou MTTR). A correta seleção do equipamento a ser analisado é fundamental para a gestão da manutenção, a fim de otimizar a utilização dos seus recursos, visando atingimento das metas do setor da manutenção e da organização.

A redução do MTTR foi observada na prática no ano de 2019, após a aplicação do M-VSM e das ferramentas do *Lean Manufacturing* para redução/eliminação dos desperdícios ao longo da atividade de manutenção corretiva do equipamento. Entretanto o aumento do MTBF não aconteceu, devido a uma falha na execução do FMEA do equipamento, onde a principal causa dos problemas do ano de 2019 não foi contemplada no estudo, assim não sendo abordada na estratégia de manutenção. Mesmo com a falha na execução de um dos métodos propostos no modelo, pode-se concluir que o modelo integrado é eficaz, tendo como premissa a correta execução dos métodos que o modelo propõe. Na simulação realizada, expurgando as paradas devido a causa não considerada no FMEA, haveria um aumento no MTBF do equipamento de 20,6%.

A redução do MTTR do equipamento no ano de 2019 foi de 20% e, com isso, houve um aumento na disponibilidade da unidade produtiva em 13,05 horas, visto que o granulador rotativo é um equipamento que não apresenta redundância na linha de produção e todo ganho de disponibilidade no equipamento reflete diretamente na unidade produtiva. Com esse tempo disponível a mais para produção é possível produzir em média 1.174,5 toneladas de produto granulado. Além do ganho de disponibilidade com a diminuição do MTTR, há um ganho não mensurável de produtividade da equipe de manutenção, que terá este mesmo tempo disponível multiplicado pelo número médio de colaboradores que fazem o reparo do granulador

rotativo. Ademais, há também o efeito na cultura e clima da manutenção, que com esta melhoria pode estender as boas práticas para os demais equipamentos.

Enfim, como recomendação para trabalhos futuros sugere-se a replicação do modelo integrado proposto em outra unidade produtiva e/ou empresa, a fim de avaliar as premissas adotas na modelagem e permitir a identificação de oportunidades para o modelo. Além disso, para o caminho A do modelo que visa a melhoria do MTBF através de uma estratégia de manutenção mais assertiva, recomenda-se a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) para desenvolvimento/revisão da estratégia de manutenção.

7 REFERÊNCIAS

7.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS

ABDULMALEK, F. A.; RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. **International Journal of production economics**, v. 107, n. 1, p. 223-236, 2007.

ALSYOUF, I. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. **International Journal of production economics**, v. 105, n. 1, p. 70-78, 2007.

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

CARLSON, C. **Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis.** John Wiley & Sons, 2012.

CHOWDARY, B. V.; GEORGE, D. Improvement of manufacturing operations at a pharmaceutical company. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2012.

CRAFT, R. C.; LEAKE, C. The Pareto principle in organizational decision making. **Management Decision**, v. 40, n. 8, p. 729-733, 2002.

DAL FORNO, A. J.; PEREIRA, F. A.; FORCELLINI, F. A.; KIPPER, L. M. Value Stream Mapping: a study about the problems and challenges found in the literature from the past 15 years about application of Lean tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 5-8, p. 779-790, 2014.

DE ALMEIDA, P. S. **Gestão da Manutenção Aplicado às Áreas Industrial, Predial e Elétrica.** Saraiva Educação SA, 2018.

DEKKER, R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. **Reliability engineering & system safety**, v. 51, n. 3, p. 229-240, 1996.

DENNIS, P. **Produção Lean Simplificada**. Tradução Rosalia A. N. Garcia. Porto Alegre. Bookman, 2008.

FABRO, E. **Modelo para planejamento de manutenção baseado em indicadores de criticidade de processo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

FACCIO, M.; PERSONA, A.; SGARBOSSA, F.; ZANIN, G. Industrial maintenance policy development: A quantitative framework. **International Journal of Production Economics**, v. 147, p. 85-93, 2014.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. 265 p.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

FRASER, K. Facilities management: the strategic selection of a maintenance system. **Journal of Facilities Management**, 2014.

FUENTES, F. E. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa.** Plageder, 2009.

GOMES, L. C.; MULLER, C.; KLIEMANN NETO, F. Utilização do Balanced Scorecard (BSC) para avaliar a contribuição do Sistema Toyota de Produção (STP) à estratégia das empresas. **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-ENENGEP**, 2001.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE MASSACHUSETTS. How AI Change the Rules: New Imperatives for the Intelligent Organization. **Custom Research Report**, Estados Unidos, p. 1-24, 2020.

KOMONEN, K. A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and

benchmarking. **International journal of production economics**, v. 79, n. 1, p. 15-31, 2002.

KNIGHTS, P. F. Downtime priorities, Jack-knife diagrams, and the business cycle. **Maintenance Journal**. 2004. Vol. 17, N° 2, p 14-21.

LABIB, A. W. A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 10, n. 3, p. 191-202, 2004.

MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B.; XAVIER, A. F.; CAMPOS, D. F. Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução. **Production**, v. 22, n. 1, p. 1-13, 2012.

MOSTAFA, S.; DUMRAK, J.; SOLTAN, H. Lean maintenance roadmap. **Procedia Manufacturing**, v. 2, p. 434-444, 2015.

MÜLLNER, N. **Simulation of Self-Stabilizing Distributed Algorithms to Determine Fault Tolerance Measures.** 2007. Tese de Doutorado. Diplomarbeit, Department für Informatik, Fakultät II-Informatik, Wirtschafts-und Rechtswissenschaften, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg (Oldb), Germany.

NASH, M. A.; POLING, S. R. **Mapping the total value stream: a comprehensive guide for production and transactional processes.** CRC Press, 2011.

PINJALA, S. K.; PINTELON, L.; VEREECKE, A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. **International journal of production economics**, v. 104, n. 1, p. 214-229, 2006.

PINTO, J. P. **Manutenção lean.** Lisboa: Lidel, 2013. 285 p.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda.** Lean Enterprise Institute, 2003.

SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. P. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean

manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM),** v. 9, n. 3, p. 811-833, 2016.

SAWHNEY, R.; KANNAN, S.; LI, X. Developing a value stream map to evaluate breakdown maintenance operations. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 4, n. 3, p. 229-240, 2009.

SEECHARAN, T.; LABIB, A.; JARDINE, A. Maintenance strategies: decision making grid vs Jack-knife diagram. **Journal of Quality in Maintenance Engineering,** v. 24, n. 1, p. 61-78, 2018.

SEPPÄLÄ, P.; KLEMOLA, S. How do employees perceive their organization and job when companies adopt principles of lean production?. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, v. 14, n. 2, p. 157-180, 2004.

SHAHIN, A.; LABIB, A.; EMAMI, S.; KARBASIAN, M. Improving Decision-Making Grid based on interdependence among failures with a case study in the steel industry. **The TQM Journal**, v. 31, n. 2, p. 167-182, 2019.

SHOU, W.; WANG, J.; WU, P.; WANG, X.; CHONG, H. Y. A cross-sector review on the use of value stream mapping. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 13, p. 3906-3928, 2017.

SIFONTE, J. R.; REYES-PICKNELL, J. V. **Reliability Centered Maintenance–Reengineered: Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R®**. CRC Press, 2017.

SMITH, R.; HAWKINS, B. **Lean maintenance: reduce costs, improve quality, and increase market share**. Elsevier, 2004.

SMITH, R.; MOBLEY, R. K. **Rules of thumb for maintenance and reliability engineers**. Butterworth-Heinemann, 2011.

SMITH, R. What is Lean maintenance? Elements that need to be in place for success. **Maintenance Technology**, v. 17, n. 10, p. 15-21, 2004.

TAPPING, D.; SHUKER, T. Value Stream Management for the Lean Office: Eight Steps to Planning, Mapping, & Sustaining Lean Improvements in Administrative Areas. **Productivity Press**, 2018.

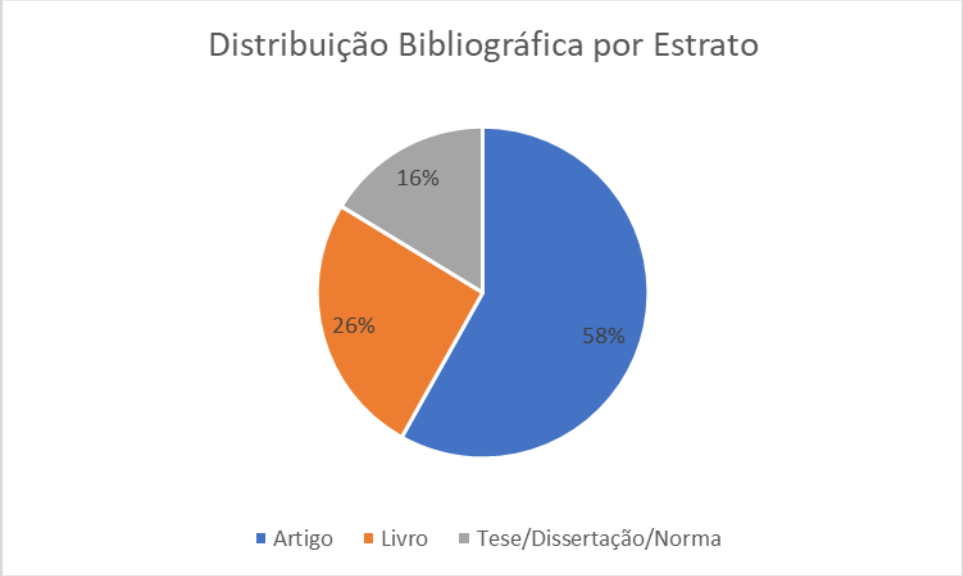
TORTORELLA, G. L.; FOGLIATTO, F. S.; ANZANELLO, M.; MARODIN, G. A.; GARCIA, M.; REIS ESTEVES, R. Making the value flow: application of value stream mapping in a Brazilian public healthcare organisation. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 28, n. 13-14, p. 1544-1558, 2017.

VISHNU, C. R.; REGIKUMAR, V. Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. **Procedia technology**, v. 25, p. 1080-1087, 2016.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. Lean thinking—banish waste and create wealth in your corporation. **Journal of the Operational Research Society**, v. 48, n. 11, p. 1148-1148, 1997.

7.2 REFERÊNCIAS POR ESTRATO

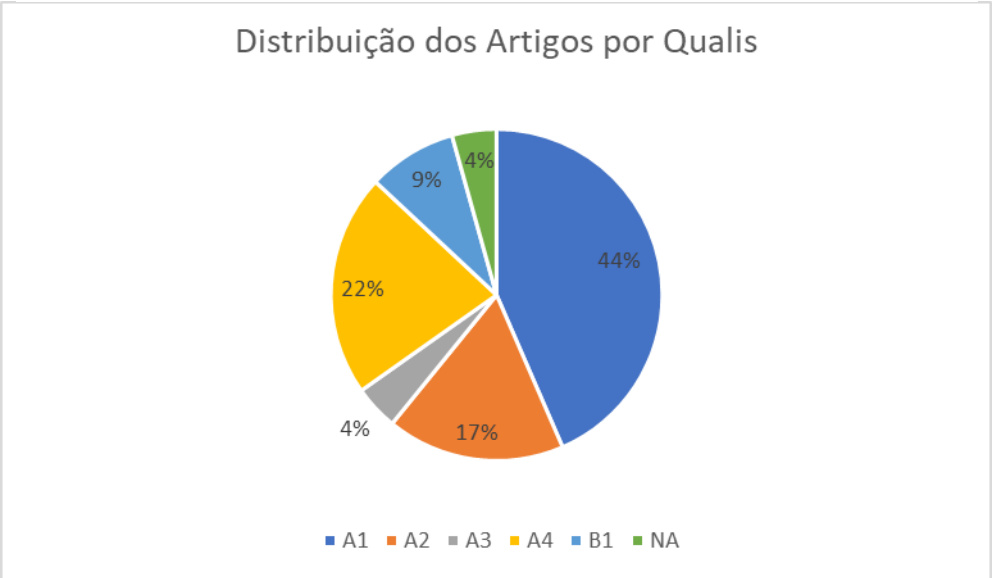
Figura 32 - Distribuição Bibliográfica por Estrato.



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS

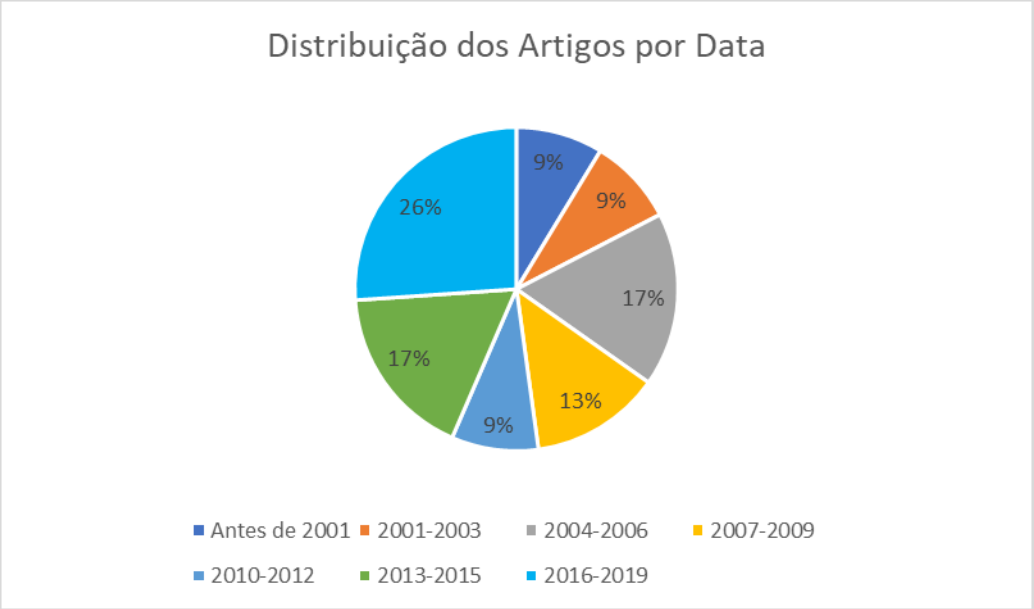
Figura 33 - Distribuição dos Artigos por Qualis



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.4 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS

Figura 34 - Distribuição dos Artigos por Data



Fonte: Elaborado pelo autor.

8 APÊNDICE

Tabela 7 - Lista completa dos equipamentos da planta de granulação com seus respectivos valores de MTBF e distribuição.

Equipamento	MTBF	Distribuição
120-TP-08B	14,11	WEIBULL
120-RR-02	17,91	WEIBULL
120-MO-01C	18,29	WEIBULL
120-MO-01B	19,77	GAMA
120-MO-01A	20,56	WEIBULL
120-TP-08D	21,87	LOGNORMAL
120-MO-01D	25,17	GAMA
120-CC-03B	26,49	WEIBULL
120-TP-09	28,33	WEIBULL
120-TP-04B	31,36	WEIBULL
120-TP-08C	35,26	WEIBULL
120-TP-01	35,38	WEIBULL
120-TP-06	36,73	WEIBULL
120-CC-03A	42,5	WEIBULL
120-MG-02	43	WEIBULL
120-TP-08A	43,51	WEIBULL
120-PP-01	47,17	WEIBULL
120-VV-01	48,24	WEIBULL
120-TP-04A	49,08	WEIBULL
120-BB-12	53,64	WEIBULL
120-EL-01	54,77	WEIBULL
120-BL-01	56,59	WEIBULL
120-MO-02B	57	WEIBULL
120-TP-24	57,83	WEIBULL
120-TP-07A	59,77	WEIBULL
120-MO-02A	60,33	WEIBULL
120-TP-13	66,37	WEIBULL
120-TP-07B	71,82	WEIBULL

120-CV-01D	75,33	NORMAL
120-EL-02A	76,83	NORMAL
120-SC-01	77,2	WEIBULL
120-EL-02B	78,66	WEIBULL
120-FIC-11	86,86	WEIBULL
120-PN-03B	93,5	NORMAL
120-TP-16	103,64	WEIBULL
120-CV-01C	106,62	WEIBULL
120-DG-01	107,5	NORMAL
120-FL-05A	108,25	NORMAL
120-LL-07	115,33	NORMAL
120-TP-26B	116,5	NORMAL
120-TP-17	118	NORMAL
120-TP-30	120,33	NORMAL
120-TP-28	121,5	NORMAL
120-TP-10	122,33	NORMAL
120-PN-01B	124	NORMAL
120-PN-01A	131	NORMAL
120-CV-01A	133,5	NORMAL
120-TP-11	135,67	NORMAL
120-PN-02A	139	NORMAL
120-TP-23C	140,48	GAMA
120-CC-01	146,66	NORMAL
120-TP-12	150	NORMAL
120-EL-04	150,26	WEIBULL
120-TP-15	158	NORMAL
120-UH-01A	167	NORMAL
120-DR-01A	177	NORMAL
120-BB-14	192,5	NORMAL
120-PN-01C	197	NORMAL
120-CC-02	197,5	WEIBULL
120-TP-08B	14,11	WEIBULL

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 - Peso de cada categoria para avaliação da criticidade.

Item	Categoria	Impacto do equipamento segundo categoria	Peso da categoria
A	Segurança das pessoas e impacto no meio ambiente	Sem potencial para lesões ou necessita primeiro socorro; Sem efeito em sistema de segurança; Sem potencial para incêndio/explosão; Sem potencial para dano ambiental	0
		Potencial para lesões com afastamento, restrição ao trabalho ou tratamento médico. Efeito limitado em sistemas de segurança; Sem potencial para incêndio/explosão em área classificada; Potencial para dano ambiental moderado	0,5
		Potencial para fatalidade ou lesão incapacitante; Indisponibilidade de sistemas críticos de segurança; Potencial para incêndio/explosão em área classificada; Potencial para amplo dano ambiental	1
B	MTTR/MTBF	<0,2	0,2
		0,2<x<0,4	0,4
		0,4<x<0,6	0,6
		0,6<x<0,8	0,8
		>0,8	1
C	Nível de redundância	Não para planta	0
		Rate Reduction	0,5
		Para planta	1
D	Origem	Nacional	0,5
		Importado	1
E	Mão de obra	Própria	0,5
		Terceirizada	1
F	Qualidade	Não afeta a qualidade do produto final	0,5
		Afeta a qualidade do produto final	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - FMEA do granulador rotativo.

ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DE FALHA (FMEA)									
UNIDADE: GRANULAÇÃO (CR120)			**EQUIPE:** THIAGO OLINTO, OTAVIO SANTOS, MATHEUS ROCHA E HENRIQUE BRUM				**DATA DE EMISSÃO:** 13/11/2018		
EQUIPAMENTO: GRANULADOR ROTATIVO			**LÍDER:** THIAGO OLINTO				**ÚLTIMA REVISÃO:** -		
COMPONENTES	**FUNÇÃO**	**MODO DE FALHA**	**EFEITO**	**SEV**	**CAUSA**	**OCO**	**CONTROLES ATUAIS**	**DET**	**RPN**
Revestimento interno	Garantir que o produto não grude nas paredes, mantendo a granulação operando.	Desgaste	Adesão de produto nas paredes do granulador	3	Remoção superficial por material mais duro.	5	Inspeção sensitiva em parada mensal	2	30
		Deformação	Rolagem irregular na queda do grão.	2	Fadiga	4		4	32
		Ruptura	Adesão de produto nas paredes do granulador	3	Esforço excessivo pelo contato de corpos estranhos (bengala, tubulão e espargidor)	3	-	5	45
					Esforço excessivo pelo desprendimento de material agregago na porção anterior do revestimento	1	-	5	15
					Corrosão química devido a utilização de revestimento fora de especificação	2	Inspeção sensitiva em parada mensal	2	12
Elemento de fixação do revestimento interno	Manter o revestimento interno fixado a estrutura do tambor	Corrosão química	Desprendimento do revestimento	4	Acidez livre do SSP	5	Medição a cada duas horas do PH	1	20
		Deformação	Adesão de produto nas paredes do granulador	3	Impacto excessivo	3	-	5	45
					Falha de montagem	3	Inspeção sensitiva em parada mensal	4	36
		Fratura	Desprendimento do revestimento	4	Impacto excessivo	3	-	5	60
					Corrosão química	3	Inspeção sensitiva em parada mensal	3	36
					Falha de montagem	3		4	48
Mancal	Alojar e apoiar o rolamento	Fratura	Perda de movimento e de sustentação do rolamento	5	Sobrecarga	3	Análise de vibração mensal	1	15
					Desalinhamento	3		1	15
					Falta rigidez na base	2		1	10
		Desgaste	Diminuição da rotação nominal	1	Fricção	1	Análise de vibração mensal, inspeção sensitiva semanal e termografia semanal	1	1
		Vazamento	Aquecimento do rolamento	1	Vedação ineficiente	3	Inspeção sensitiva semanal	3	9
		Contaminação			Acúmulo de produto	5	Inspeção sensitiva semanal	1	5

Rolamento	Suportar o eixo e permitir a rotação do tambor, minimizando a fricção das peças móveis	Fratura	Perda de movimento do rolo	5	Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	15
					Sobrecarga	3	Termografia semanal	2	30
					Falha de montagem	2	-	5	50
					Fadiga	1	Análise de vibração mensal	1	5
		Travamento			Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	15
					Contaminação	2	Análise de vibração mensal, inspeção sensitiva semanal e termografia semanal	1	10
					Falha de montagem	2	-	5	50
					Superaquecimento	2	Termografia semanal	2	20
					Armazenamento inadequado	2	-	5	50
		Desgaste	Aumento vibração	1	Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	3
					Desalinhamento	2	Análise de vibração mensal	1	2
					Falha de montagem	2	-	5	10
					Sobrecarga	3	Termografia semanal	2	6
		Corrosão química			Contaminação	2	Análise de vibração mensal, inspeção sensitiva semanal e termografia semanal	1	2
		Erosão			Corrente parasita	1	-	5	5
		Deformação			Sobrecarga	3	Termografia semanal	2	6
					Contaminação	2	Análise de vibração mensal, inspeção sensitiva semanal e termografia semanal	1	2
Coroa e Pinhão	Transmitir o movimento do tambor	Desgaste superficial	Modificação do perfil da folga (backlash) entre os dentes	1	Partículas abrasivas	5	-	5	25
					Falha de lubrificação	4	Análise de vibração mensal, inspeção sensitiva semanal e termografia semanal	1	4
					Desalinhamento	2	Análise de vibração mensal	1	2
					Sobrecarga	3	-	5	15
					Falha de montagem	2	-	5	10
					Material utilizado incorreto	1	-	5	5
		Fratura do dente	Aumento da vibração, do ruído e fratura dos outros dentes	5	Desalinhamento	2	Análise de vibração mensal	1	10
					Sobrecarga	3	-	5	75
					Falha de montagem	2	-	5	50
					Impacto excessivo	2	-	5	50
		Fratura da fixação ao tambor	Perda de movimento do tambor	4	Falha de montagem	2	-	5	40
					Furo com dimensões incorretas	1	-	5	20

Rolo de apoio	Sustentar e manter alinhamento do tambor	Fratura do eixo	Desalinhamento do tambor	5	Fadiga	3	-	5	75
					Sobrecarga	3	-	5	75
					Material utilizado incorreto	1	-	5	25
					Falha de montagem	1	-	5	25
					Desalinhamento	1	Análise de vibração mensal	1	5
					Corrosão química	3	Inspeção sensitiva semanal	2	30
		Fratura do rolamento			Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	15
					Corrosão química	2	Inspeção sensitiva semanal	2	20
					Contaminação	2	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	10
					Travamento	3	Inspeção sensitiva semanal	1	15
					Sobrecarga	3	-	5	75
		Desgaste superficial	Perda de diâmetro do rolo e aumento da temperatura do rolamento	1	Desalinhamento	2	Análise de vibração mensal	1	2
					Falha de lubrificação	3	Inspeção sensitiva semanal	2	6
					Corrosão química	2		2	4
					Adesão de produto	5		2	10
		Má fixação do mancal	Aumento da vibração do mancal		Falha de montagem	2	-	5	10
					Furo com dimensões incorretas	1	-	5	5
					Vibração excessiva	3	Análise de vibração mensal	1	3
					Corrosão química do parafuso	5	Inspeção sensitiva semanal	2	10
Rolo de escora	Limitar movimento do tambor	Fratura do rolamento	Aumento da temperatura e ruído	1	Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	3
					Sobrecarga	3	-	5	15
					Contaminação	1	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	1
					Falha de montagem	3	-	5	15
					Corrosão química	1	-	2	2
					Travamento	3	Inspeção sensitiva semanal	1	3
		Desgaste superficial	Aumento do deslocamento axial do tambor	1	Sobrecarga	2	-	5	10
					Desalinhamento	1	Análise de vibração mensal	1	1
					Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e inspeção sensitiva semanal	1	3
					Corrosão química	2	Inspeção sensitiva semanal	2	4
Base dos rolos	Sustentar o rolo de escora	Fratura	Deslocamento do rolo de escora	1	Sobrecarga	1	-	5	5
					Corrosão dos parafusos de fixação	5	Inspeção sensitiva semanal	2	10
		Desgaste	Perda de espessura		Corrosão da base	3		2	6
Pista de rolagem	Permitir o contato do tambor com os rolos de apoio	Fratura	Perda de movimento do tambor	5	Folga excessiva entre o tambor e a pista	1		3	15
					Sobrecarga	3	-	5	75
					Desalinhamento	2	-	5	50
					Falha de montagem	2	-	5	50
		Desgaste	Desalinhamento do tambor	1	Corrosão química	5	Inspeção sensitiva semanal	2	10
					Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e inspeção sensitiva semanal	1	3
					Adesão de produto	5	Inspeção sensitiva semanal	2	10
					Desalinhamento	2	-	5	10

Selo de entrada	Impedir vazamento do conteúdo	Desgaste	Perda de produto por vazamento	2	Atrito excessivo	5	-	5	50
					Acumulo de material	5	Inspeção sensitiva semanal	2	20
					Falha de fabricação	2	-	5	20
					Falha de montagem	2	-	5	20
		Deformação			Atrito excessivo	5	-	5	50
					Acumulo de material	5	Inspeção sensitiva semanal	2	20
					Falha de fabricação	2	-	5	20
					Falha de montagem	2	-	5	20
Acoplamento de engrenagem	Transmissão do movimento e potência	Fratura	Perda de movimento do tambor	5	Vibração excessiva	1	Análise de vibração mensal	1	5
					Desalinhamento	2		1	10
					Sobrecarga	3	-	5	75
					Reversão do sentido de rotação	3	-	5	75
					Falha de montagem	2	Inspeção sensitiva semanal	3	30
		Desgaste dos dentes	Modificação do perfil da folga (backlash) entre os dentes	1	Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal	1	3
					Falha de montagem	2	Inspeção sensitiva semanal	3	6
					Sobrecarga	3	-	5	15
					Desalinhamento	2	Análise de vibração mensal	1	2
		Cisalhamento do elemento de fixação	Perda de movimento do tambor	4	Falha de montagem	2	Inspeção sensitiva semanal	3	24
					Sobrecarga	3	-	5	60
					Falha de projeto	1	-	5	20
					Corrosão química	3	Inspeção sensitiva semanal	2	24
Acoplamento hidrodinâmico	Transmissão do movimento e absorção de oscilações	Ausência da transmissão de movimento	Perda de movimento do tambor	5	Quantidade de fluido inadequado	3	Termografia semanal	2	30
					Sobrecarga	2	-	5	50
		Vazamento	Aumento da temperatura	2	Falha de montagem dos fusíveis de segurança	1	-	5	10
					Vedação ineficiente	1	Inspeção sensitiva semanal	2	4
		Fratura do rolamento	Perda de movimento do tambor	5	Desalinhamento	1	Análise de vibração mensal	1	5
					Sobrecarga	2	Termografia semanal	2	20
					Fadiga	1	Análise de vibração mensal	1	5
					Falha de lubrificação	1	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	5
		Desgaste do elemento elástico	Aumento da vibração	1	Falha de alinhamento	1	Análise de vibração mensal	1	1
					Superaquecimento	2	Termografia semanal	2	4
					Contaminação	2	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	2
					Falha de montagem	1	-	5	5
		Vibração excessiva	Aumento do ruído	1	Falta rigidez na base	2	Análise de vibração mensal	1	2
					Desgaste do elemento elástico	3	-	5	15
					Rolamento danificado	2	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	2
					Falha de montagem do elemento de fixação	2	-	5	10
					Corrosão do elemento de fixação	2	Inspeção sensitiva semanal	2	4
					Desalinhamento	1	Análise de vibração mensal	1	1
					Desbalanceamento	1	Análise de vibração mensal	1	1

	Proteção do acoplamento	Proteger acoplamento	Má fixação dos componentes	Aumento da vibração	1	Falha de montagem	2	Inspeção sensitiva semanal	2	4
						Falha de projeto	1	-	5	5
			Corrosão química	Perda de espessura		Ambiente agressivo	2	-	5	10
						Perda do revestimento/pintura	3	Inspeção sensitiva semanal	1	3
			Fratura da proteção	Ausência de proteção do acoplamento	4	Sobrecarga	1	-	5	20
			Cisalhamento do elemento de fixação			Falha de montagem	2	Inspeção sensitiva semanal	2	16
						Sobrecarga	1	-	5	20
						Falha de projeto	1	-	5	20
						Corrosão química	5	Inspeção sensitiva semanal	2	40
Motor	Parte elétrica	Fornecer energia elétrica	Não parte sob demanda	Ausência de movimento do motor	4	Comando não funciona adequadamente	3	Manutenção preventiva cada quatro meses	3	36
						Alimentação deficiente	1		2	8
						Travamento mecânico	2		3	24
						Circuito de proteção atuado	3		2	24
			Não para sob demanda	Risco de segurança	5	Comando não funciona adequadamente	3		3	45
						Circuito de proteção defeituoso	2		3	30
	Caixa de ligação	Proteger componentes internos da caixa	Perda da vedação	Contaminação das partes internas do motor	1	Má fixação	3		2	6
						Vedação ineficiente	3		2	6
			Contaminação	Queima do motor	5	Má fixação	3		2	30
						Vedação ineficiente	3		2	30
			Perda de contato elétrico			Ligação deficiente	2		2	20
	Rotor	Fornecer energia mecânica	Fratura (rolamento)	Perda de movimento do motor	5	Desalinhamento	1	Análise de vibração mensal	1	5
						Falha de montagem	1	-	5	25
						Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal e termografia semanal	1	15
						Rotor desbalanceado	1	Análise de vibração mensal	1	5
						Sujidade do sistema de arrefecimento	5	Inspeção sensitiva semanal e termografia semanal	2	50
						Sobrecarga	1	Termografia semanal	2	10
						Defeito de fabricação	1	-	5	25
						Fadiga	1	-	1	5
			Fratura da gaiola	Desbalanceamento e perda de torque	1	Sobrecarga	1	-	5	5
						Abrasão	1	-	5	5
			Fratura do eixo	Perda de movimento do motor	5	Chaveta mal dimensionada	1	-	5	25
						Falha de montagem	1	-	5	25
						Eixo empenado	1	Análise de vibração mensal	1	5
						Desbalanceamento	1		1	5
						Sobrecarga	1	-	5	25
			Corrosão química	Perda de espessura	1	Contaminação	1	-	5	5
						Umidade excessiva	2	-	5	10
	Estator	Promover campo magnético	Corrosão química	Perda de espessura	1	Contaminação	1	-	5	5
			Perda de isolação	Queima do motor	5	Sobrecarga	2	-	5	50
						Contaminação	3	-	5	75
						Umidade excessiva	2	-	5	50
	Carcaça		Quebra da ventoinha	Aumento da temperatura	3	Vibração excessiva	3	Análise de vibração mensal	1	9
						Má fixação	2		1	6
						Presença de partículas abrasivas	3	-	5	45
			Obstrução da ventoinha			Acúmulo de produto	3	Inspeção sensitiva semanal	1	9
			Corrosão química da carcaça	Perda de espessura	1	Perda do revestimento	5		1	5
										5
			Vibração excessiva	Quebra dos componentes	3	Parafusos ou roscas fora de especificação	2	-	5	30
						Falha de montagem	3	-	5	45

Redutor	Carcaça	Proteção dos componentes internos do redutor	Fratura	Vazamento e contaminação do óleo lubrificante	2	Sobrecarga	1	-	5	10
						Alta temperatura	1	Termografia semanal	2	4
						Vibração excessiva	1	Análise de vibração mensal	1	2
			Quebra da ventoinha	Aumento da temperatura	1	Vibração excessiva	3		1	3
						Má fixação	2	-	5	10
						Presença de partículas abrasivas	3	-	5	15
			Obstrução da ventoinha			Acúmulo de produto	3	Inspeção sensitiva semanal	1	3
			Corrosão química	Perda de espessura	1	Contaminação	3		3	9
						Perda do revestimento	3		1	3
			Má fixação dos componentes	Aumento da vibração	1	Parafusos ou roscas fora de especificação	2	-	5	10
						Falha de montagem	3	-	5	15
	Mancal	Alojar e apoiar o rolamento	Desgaste	Diminuição da rotação nominal	1	Fricção	3	Termografia semanal	2	6
			Vazamento	Aquecimento do rolamento	1	Vedação ineficiente	3	Inspeção sensitiva semanal	1	3
			Contaminação			Acúmulo de produto	5		1	5
	Engrenagem	Transmitir o movimento do tambor	Vibração excessiva	Aumento do ruído e desgaste dos dentes	1	Empenamento do eixo	1	Análise de vibração mensal e inspeção sensitiva semanal	1	1
						Desbalanceamento	1	Análise de vibração mensal	1	1
						Falha de lubrificação	3		1	3
						Falha de projeto	1	-	5	5
			Desgaste superficial	Modificação do perfil da folga (backlash) entre os dentes	1	Partículas abrasivas	3	-	5	15
						Falha de lubrificação	3	Análise de vibração mensal	1	3
						Desalinhamento	2		1	2
						Sobrecarga	2	-	5	10
						Falha de montagem	3	-	5	15
						Material utilizado incorreto	1	-	5	5
			Fratura do dente	Aumento da vibração, do ruído e do desgaste dos outros dentes	1	Desalinhamento	2	Análise de vibração mensal	1	2
						Sobrecarga	2	-	5	10
						Falha de montagem	3	-	5	15
						Impacto excessivo	2	-	5	10
	Retentor	Efetuar a vedação do óleo	Quebra do retentor	Vazamento e contaminação do óleo lubrificante	2	Falha de especificação do material	1	-	5	10
						Falha de montagem	3	-	5	30
						Desalinhamento	2	Análise de vibração mensal	1	4
	Eixo	Efetuar o acionamento do equipamento	Desgaste/folga na região da chaveta	Aumento da vibração e perda de diâmetro	1	Chaveta mal dimensionada	2	-	5	10
						Fratura da chaveta	2	-	5	10
						Falha de montagem	3	-	5	15
			Folga no assentamento do rolamento	Aumento da vibração e desgaste do eixo	1	Falha de montagem	3	-	5	15
						Falha de fabricação	2	-	5	10
						Falha de projeto do eixo	1	-	5	5
			Desgaste na região do retentor	Vazamento de óleo lubrificante	2	Falha de montagem (pressão excessiva no retentor)	3	-	5	30
						Presença de partículas abrasivas	3	-	5	30
			Vibração excessiva	Quebra do rolamento	5	Eixo empenado	2	Análise de vibração mensal	1	10
			Eixo empenado	Aumento da vibração	1	Material do eixo fora de especificação	2	-	5	10
						Desbalanceamento	2	Análise de vibração mensal	1	2
						Sobrecarga	2	-	5	10
	Respiro	Eliminar os gases internos gerados pelo óleo	Obstrução	Aumento de pressão, ocasionando o vazamento do retentor	2	Excesso de sujeira	5	Inspeção sensitiva semanal	2	20
			Fratura	Vazamento e contaminação do óleo lubrificante	1	Impacto	1	-	5	5
			Saturação	Aumento de pressão, ocasionando o vazamento do retentor	2	Excesso de sujeira	5	Inspeção sensitiva semanal	2	20

Proteção coroa/pista de rolagem	Proteger a coroa e proteger a pista de rolagem	Má fixação dos componentes	Aumento da vibração	1	Falha de montagem	3	Inspeção sensitiva semanal	3	9
					Falha de fabricação	2	-	5	10
		Corrosão química	Perda de espessura	1	Ambiente agressivo	5	-	5	25
					Perda do revestimento/pintura	5	Inspeção sensitiva semanal	1	5
		Cisalhamento do elemento de fixação	Exposição da coroa e da pista de rolagem	1	Parafusos ou roscas fora de especificação	2	-	5	10
					Falha de montagem	3	Inspeção sensitiva semanal	2	6
					Corrosão química	5		2	10
Tubo de vapor e tubo de água externos	Transportar fluido para o granulador	Corrosão química	Perda de espessura	1	Materiais dissimilares	2	-	5	10
					Fluido com alta acidez	5	Medição a cada duas horas do PH	1	5
					Ambiente agressivo	5	-	5	25
		Vazamento	Perda de eficiência do granulador	2	Vibração excessiva	1	Análise de vibração mensal	1	2
					Má fixação	3	Análise de vibração mensal e inspeção sensitiva semanal	1	6
Espargidor de vapor e espargidor de água	Injetar líquidos granulantes	Corrosão química	Perda de espessura	1	Materiais dissimilares	1	-	5	5
					Acidez livre do SSP	5	Medição a cada duas horas do PH	1	5
					Parâmetros de processo inadequados	3	Medição a cada duas horas do PH e temperatura	1	3
		Abrasão	Quebra do espargidor	4	Excesso de particulado	4	Inspeção sensitiva de hora em hora	2	32
					Velocidade excessiva do produto	2	-	5	40
		Fratura	Perda de eficiência do granulador	2	Fadiga	1	-	5	10
					Sobrecarga	1	-	5	10
					Deslocamento de pedra que se formou sobre o tubulão	3	-	5	30
		Entupimento	Perda da função de granulação	4	Baixa pressão do fludio injetado no granulador	1	-	5	20
Estrutura	Suportar conjunto	Fratura	Colapso do granulador. Risco de acidente.	5	Sobrecarga	1	-	5	25
					Fadiga	1	-	5	25
		Desgaste	Sobrecarga do restante da estrutura	3	Corrosão química	5	Inspeção sensitiva semanal	2	30
Caída de entrada	Direcionar o produto do elevador para o granulador	Obstrução	Parada do equipamento	3	Acúmulo de produto	4		2	24
		Desgaste da borracha	Diminuição da alimentação do granulador e contaminação da unidade	2	Má distribuição do produto	2	-	5	20
					Material abrasivo	5	-	5	50
Caída de saída	Direcionar o produto do granulador para o secador	Obstrução	Parada do equipamento	3	Acúmulo de produto	4	Inspeção sensitiva semanal	2	24
		Desgaste da borracha	Diminuição da alimentação do secador e contaminação da unidade	3	Má distribuição do produto	4	Inspeção sensitiva semanal	2	24
					Material abrasivo	5	-	5	75
		Incêndio	Parada emergencial. Risco de acidente.	5	Alta temperatura	3	Medição de temperatura a cada duas horas	1	15
					Falha no ventilador de exaustão	3	-	5	75

Cilindro pneumático	Desprender produto das caídas	Vazamento de ar	Perda de pressão do cilindro	1	Vedação ineficiente	2	Inspeção sensitiva semanal	2	4
					Fratura das tubulações flexíveis	1		2	2
					Desgaste da haste	2		2	4
		Perda de pressão	Acúmulo de produto na caída	3	Vazamento de ar	2		2	12
					Volume de ar insuficiente	1	-	5	15
		Calço hidráulico	Perda de curso do cilindro e deformação da haste	1	Excesso de lubrificante	1	-	5	5
					Má regulagem da vazão do lubrifil	2	Inspeção sensitiva semanal	2	4
		Deformação da haste	Avaria no sistema de vedação	1	Falha de montagem do cilindro	1	-	5	5
Lubrifil	Lubrificar, filtrar, drenar e regular a pressão do cilindro pneumático.	Saturação do filtro	Diminuição da pressão e da eficiência de filtragem	1	Contaminação	4	Inspeção sensitiva semanal	3	12
					Má qualidade do ar	4	-	5	20
					Excesso de óleo	2	-	5	10
		Lubrificação ineficiente	Danos à haste e travamento dos componentes	1	Falta de óleo	3	Inspeção sensitiva semanal	2	6
					Má regulagem da vazão do lubrifil	2		2	4
					Contaminação	4		3	12
					Entupimento	1		1	1
		Fratura da manopla	Incapacidade de regular a pressão e a vazão do óleo	1	Sobrecarga no aperto	2	-	5	10
		Entupimento do dreno	Incapacidade de purgar o sistema	1	Contaminação	4	Inspeção sensitiva semanal	3	12
		Fratura da mola	Incapacidade de regular a pressão do ar	1	Fadiga	1	-	5	5
					Sobrecarga	1	-	5	5
		Fratura do diafragma	Contaminação do ar	1	Fadiga	1	-	5	5
					Sobrecarga	1	-	5	5
		Vazamento de fluido	Falta de lubrificação do sistema	1	Fratura do copo	1	Inspeção sensitiva semanal	1	1
					Fratura da manopla	2		1	2
Suporte espargidor (bengala)	Sustentar o espargidor	Corrosão química	Perda da função de sustentação	4	Materiais dissimilares	1	-	5	20
					Acidez livre do SSP	5	Medição a cada duas horas do PH	1	20
					Parâmetros de processo inadequados	3	Medição a cada duas horas do PH e temperatura	1	12
		Abrasão	Quebra da bengala		Excesso de particulado	3	Inspeção sensitiva de hora em hora	2	24
		Fratura	Quebra do espargidor		Sobrecarga	1	-	5	20
					Corrosão da fixação	3	Inspeção sensitiva em parada mensal	3	36
Tubulão	Sustentar a bengala e estruturar a frente e o fundo do granulador	Corrosão química	Perda de espessura	1	Materiais dissimilares	1	-	5	5
					Acidez livre do SSP	5	Medição a cada duas horas do PH	1	5
					Parâmetros de processo inadequados	3	Medição a cada duas horas do PH e temperatura	1	3
		Abrasão			Excesso de particulado	3	Inspeção sensitiva de hora em hora	2	6
		Fratura	Perda da conteção do material no interior do granulador e a sustentação dos elementos	5	Abrasão	5	Inspeção sensitiva em parada mensal	3	75
					Corrosão química	5		3	75

Anel de retenção	Garantir tempo de residência do produto no tambor e garantir nível	Desgaste	Perda de eficiência do granulador	3	Abrasão de produto	5	-	5	75
					Limpeza inadequada	3	-	5	45
		Fratura			Impacto por corpo estranho	3	-	5	45
		Deformação			Impacto por corpo estranho	3	-	5	45
Martelos	Desprender o material das paredes do granulador	Fratura do tubo/flange	Queda da esfera do martelo	3	Fadiga	4	-	5	60
					Corrosão química	3	-	5	45
		Queda da esfera do martelo	Risco de acidente pessoal		Fratura dos parafusos do flange	3	-	5	45
					Falha de montagem do flange	1	-	5	15
					Fratura do flange/tubo	3	-	5	45

Fonte: Elaborado pelo autor.