



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GABRIELLE ROSA RIBEIRO

**UM MODELO DINÂMICO PARA O PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES DE
MANUTENÇÃO**

Recife

2021

GABRIELLE ROSA RIBEIRO

**UM MODELO DINÂMICO PARA O PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES DE
MANUTENÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Gerência da Produção

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Cabral Seixas Costa.

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

R484m Ribeiro, Gabrielle Rosa.
Um modelo dinâmico para o planejamento das atividades de manutenção /
Gabrielle Rosa Ribeiro. - 2022.
66 folhas, il.; tab.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Cabral Seixas Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Cronograma dinâmico. 3. Cronograma de
manutenção. 4. Gestão de manutenção. I. Costa, Ana Paula Cabral Seixas
(Orientadora). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-233

GABRIELLE ROSA RIBEIRO

**UM MODELO DINÂMICO PARA O PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES DE
MANUTENÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Gerência da Produção

Aprovado em: 17/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ana Paula Cabral Seixas Costa (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Raphael Harry Frederico Ribeiro Kramer (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr^a. Cristina Gomes de Souza (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiz Carlos e Janaina, por todo o ensinamento, apoio e carinho durante a minha jornada. Agradeço os meus irmãos, por todo apoio e companheirismo. Agradeço aos meus padrinhos, Suely e Emanuel, por todo apoio fornecido durante o mestrado.

Agradeço a minha orientadora Ana Paula Cabral Seixas Costa, por todo o aprendizado, apoio e oportunidades concedidas durante o mestrado.

Agradeço aos meus amigos, por todo suporte e compreensão nos momentos difíceis. E aos meus colegas de laboratório, Roberta, Gabriel e Ísis por todo o apoio no desenvolvimento das atividades e por tornarem minha rotina de trabalho mais leve e divertida.

Agradeço a todos os meus colegas de cursos com os quais dividi dificuldades, e aos professores do PPGEF, que tiveram que se esforçar constantemente para dar continuidade as atividades durante uma pandemia.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro proporcionado para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

O planejamento das atividades de manutenção é uma ferramenta essencial para auxiliar os gestores na definição e programação das ações de manutenção. Na prática, sua implementação leva ao estabelecimento de políticas de manutenção, definindo os níveis de cada ação, frequência e otimização dos recursos associados. Uma vez definido o plano de manutenção, durante sua execução, pode ocorrer eventos, tais como falha de equipamentos que resulte em uma intervenção corretiva, implicando no replanejamento das atividades programadas. Neste contexto, um cronograma dinâmico de manutenção considera estes eventos coexistentes, devido o funcionamento constante da produção, ao atualizar as datas das atividades por meio da introdução de novas informações no sistema durante a sua execução. Ao considerar essas variações, é possível evitar paradas e atividades de manutenção desnecessárias, proporcionando economia total de custos associados às atividades de manutenção. Este trabalho apresenta um modelo dinâmico para apoiar a tomada de decisão dos gestores sobre o cronograma de atividades de manutenção, onde atualizações são feitas à medida que novas informações são inseridas ao longo de sua execução, aproveitando as oportunidades de manutenção. Foi realizada uma revisão da literatura sobre os modelos de manutenção existentes, com o intuito de fundamentar a estruturação do modelo proposto e a construção do cronograma dinâmico, o qual foi validado a partir da aplicação em uma indústria de cloro e derivados. Como resultado do estudo de caso, foi possível observar uma redução de 71% nas paradas programadas e 25% nas paradas da planta. O modelo proposto apresentou uma abordagem inovadora permitindo ajustar o cronograma das atividades conforme novos eventos ocorrem ao longo de sua execução. Trata-se de uma ferramenta capaz de auxiliar os gestores em seus processos de tomada de decisão, gerando um impacto econômico nas organizações devido à redução do tempo de improdutividade do sistema e atividades de manutenção preventivas em excesso.

Palavras-chave: cronograma dinâmico; cronograma de manutenção; gestão da manutenção.

ABSTRACT

The planning of maintenance activities is essential to assist the definition and scheduling maintenance actions. In practice, its implementation leads to the establishment of maintenance policies, defining the levels of each action, frequency, and optimization of associated resources. Once the maintenance plan is defined, during its execution, events may occur, such as equipment failure that results in a corrective intervention, which imply the replanning of scheduled activities. In this context, a dynamic maintenance schedule considers these coexisting events due to the constant running of production, updating the dates of activities by introducing new information into the system during its execution. By considering these variations, it is possible to avoid unnecessary downtime and maintenance activities, providing total cost savings associated with maintenance activities. This work presents a model to support managers' decision making about the maintenance activities schedule, where updates are made as new information is inserted throughout its execution, taking advantage of maintenance opportunities. A literature review was carried out on the existing maintenance models, in order to support the structuring of the proposed model and the construction of the dynamic schedule, which was validated from the application in a chlorine and derivatives industry. As a result, it was possible to observe a 71% reduction in scheduled shutdowns and a 25% reduction in plant shutdowns. The proposed model presented an approach capable of adjusting the schedule of activities as new events occur throughout its execution. It is a tool capable of assisting managers in their decision-making processes, generating economic impact on organizations due to the reduction of system downtime and excess preventive maintenance activities.

Keywords: dynamic schedule; maintenance schedule; maintenance management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Metodológica.....	15
Figura 2 - Diagrama do modelo proposto.....	33
Figura 3 - Fluxo do processo	41
Figura 4 - Relação entre os itens do sistema	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Duração e periodicidade da manutenção para os itens críticos do processo	43
Tabela 2 - Cronograma de manutenção programada para os itens críticos do processo	45
Tabela 3 - Primeira atualização do cronograma de manutenção	47
Tabela 4 - Cronograma atualização após a primeira ocorrência de falha.....	49
Tabela 5 - Cronograma atualização após a segunda ocorrência de falha	51
Tabela 6 - Cronograma atualização após a terceira ocorrência de falha	52
Tabela 7 - Grupos de idade e porcentagem de redução de idade	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVO	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivo Específicos	14
1.3	ESTRUTURA METODOLÓGICA	15
1.4	ESTRUTURA DA DISSERAÇÃO	16
2	BASE CONCEITUAL E REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	BASE CONCEITUAL	17
2.1.1	Manutenção	17
2.1.2	Gestão da Manutenção	18
2.1.3	Planejamento da Manutenção	19
2.1.3.1	Definição e função	19
2.1.3.2	Modelos de Manutenção	20
2.1.3.3	Políticas de manutenção	20
2.1.3.4	Manutenção corretiva	21
2.1.3.5	Manutenção preventiva	22
2.1.3.6	Sistemas multicomponentes	23
2.1.3.7	Manutenção oportuna	24
2.1.4	Modelos dinâmicos de manutenção	26
2.2	REVISÃO DA LITERATURA	26
3	MODELO PROPOSTO	31
3.1	ESTRUTURA DO MODELO	31
3.1.1	Premissas do modelo	34
3.1.2	Identificação das inter-relações dos componentes no sistema	36
3.1.3	Identificação dos componentes críticos do processo	36
3.1.4	Definição das atividades de manutenção e periodicidade	37
3.1.5	Realização das ações de manutenção corretiva ou programada	37
3.1.6	Identificação das oportunidades de manutenção	37

3.1.7	Atualização do cronograma de manutenção	39
3.2	APLICAÇÃO DO MODELO	40
3.2.1	Agrupamento das atividades programadas de manutenção	46
3.2.2	Atualização do cronograma dinâmico de manutenção	48
3.3	EXTENSÕES DO MODELO	54
3.3.1	Manutenção imperfeita	54
3.3.2	Recursos limitados	56
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	60
4.1	CONCLUSÕES	60
4.2	TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a manutenção é reconhecida como uma função essencial e um elemento crítico da gestão de ativos, que pode melhorar a eficiência do processo e a confiabilidade por meio do planejamento de intervenções de manutenção com mais eficácia (JONGE; SCARF, 2020). A manutenção tem contribuído no aumento considerável do orçamento das indústrias de manufatura, embora tenha se tornado uma capacidade estratégica organizacional, o *tradeoff* entre os custos investidos e seus benefícios ainda é uma grande preocupação para os gestores (LINNÉUSSON et al., 2020).

Em sistemas de produção modernos, os custos associados às práticas de manutenção representam uma grande proporção de todo o ciclo de custo, como, por exemplo, em turbinas eólicas offshore, os custos de operação e manutenção contribuem com uma porção significativa de 25-30% do custo total da energia (GUO et al., 2018; SARKER; FAIZ, 2016). Essa parcela significativa dos custos de manutenção tem sido um dos principais motivos que contribuíram para o aumento da relevância econômica da manutenção, visto que um gerenciamento ineficaz das atividades pode resultar em desperdício de trabalho e custos de manutenção, consumir quantidade desnecessária de recursos, produzir custos de *downtime* e reduzir a disponibilidade do sistema produtivo.

Entretanto, o desafio das organizações é conseguir estruturar esses procedimentos e atividades de manutenção a serem realizadas de forma que os objetivos estratégicos associados a eles sejam alcançados (DE ALMEIDA et al., 2015), e gerenciar os recursos para que sejam utilizados da melhor maneira possível, garantindo uma gestão eficiente e eficaz integrada à estratégia corporativa (MISHRA; ANAND; KODALI, 2006). No gerenciamento da manutenção, a etapa de planejamento tem como principal objetivo auxiliar os gestores a definir e programar as atividades de manutenção. Tal como determinar quais instalações precisam ser mantidas e quando as intervenções devem ser realizadas. Como resultado, um plano de manutenção é elaborado, representando esse conjunto estruturado de ações e identificação das necessidades de suporte, recursos e procedimentos necessários para o agendamento e execução das tarefas (MÁRQUEZ, 2007).

Na prática, as atividades definidas no plano de manutenção definem as políticas de manutenção que são desenvolvidas e personificadas com base no conjunto de intervenções e na estrutura geral na qual são previstas. Entretanto, uma vez que o plano de manutenção é definido, durante sua operação, podem ocorrer eventos que impliquem no replanejamento das atividades, de modo a reduzir a improdutividade ou melhorar a utilização dos recursos disponíveis. Como por exemplo, uma falha em um equipamento, que resulta na necessidade de uma intervenção corretiva.

Nesse contexto, um cronograma de manutenção estático manteria a programação. Isso porque em modelos estáticos, todas as datas de manutenção são programadas em intervalos regulares de tempo que não mudam ao longo do horizonte de planejamento (NICOLAI; DEKKER, 2008), podendo resultar na realização de atividades programadas no equipamento sem que haja uma real necessidade. A ideia da adoção de um cronograma dinâmico leva em consideração eventos coexistentes de manutenção devido ao funcionamento constante da produção. Em situações reais, a dinâmica do processo é capaz de afetar a condição dos componentes e conseqüentemente os cronogramas de manutenção, resultando na necessidade de incorporar informações atuais para se obter uma programação dinâmica (LIU et al., 2016), evitando a prática de intervenções desnecessárias no processo e ocasionando em uma melhor utilização dos recursos disponíveis.

No cronograma de manutenção são definidos os tempos e níveis de ações programadas, sendo evidente a necessidade de um cronograma detalhado e executável em um período de longo prazo, além do aprimoramento das estratégias de manutenção. A definição de um cronograma dinâmico das atividades de manutenção proporciona a oportunidade de se definir o momento ideal das atividades preventivas, uma vez que novas informações são inseridas ao longo de sua execução. Ao considerar essas variações é possível evitar que ocorram paradas e atividades de manutenção preventiva desnecessárias, gerando uma economia de custo total.

Nesse contexto, com o intuito de se obter um cronograma de manutenção mais prático e reduzir o custo total de manutenção, ao evitar paradas e práticas de manutenção excessivas, este trabalho tem como objetivo apoiar a tomada de decisão gerencial sobre o cronograma das atividades de manutenção, ao propor um método sistemático de programação que leva em consideração as oportunidades que surgem ao longo da execução do plano anual. A proposta do

trabalho é elaborar um modelo dinâmico que irá atualizar o cronograma das atividades conforme novos eventos acontecem no ambiente.

1.1 JUSTIFICATIVA

A prática da manutenção tem como objetivo manter uma condição adequada dos sistemas, e as organizações buscam continuamente estratégias para melhorar a eficácia dos planos de manutenção durante a operação dos sistemas (LIU *et al.*, 2021). Diante disso, com o aumento da necessidade de modelos e tecnologias de otimização na gestão da manutenção, o desenvolvimento de trabalhos de modelagem e otimização de procedimento de manutenção para sistemas multicomponente com várias interdependências tem crescido significativamente nas últimas décadas (ZHANG; ZENG, 2017).

No gerenciamento da manutenção, a elaboração do plano é feita com base nas informações disponíveis do processo, utilizando métodos adequados de programação, para que possa se atingir um desempenho esperado do sistema a um custo mínimo. Diante disso, o papel e a importância do cronograma de manutenção, como um processo de tomada de decisão tem sido cada vez mais reconhecido no setor industrial (XIA *et al.*, 2012). Uma vez que, a eficácia da manutenção está diretamente ligada ao bom planejamento dos intervalos de intervenção e muitas vezes os gestores tomam decisões com critérios inadequados (RUSCHEL; SANTOS; LOURES, 2017).

Em um processo real, sistemas de produção grandes e complexos apresentam uma ampla gama de eventos de manutenção coexistentes que são atualizados dinamicamente devido ao funcionamento constante da produção. Isso porque os recursos dinâmicos do processo são capazes de afetar as taxas de degradação dos componentes e consequentemente os cronogramas de manutenção, sendo necessária a incorporação de informações em tempo real para se obter um planejamento de manutenção dinâmico ao invés de um fixo baseado nas informações do projeto (GUO *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2016).

A justificativa deste trabalho, fundamenta-se nos altos custos das atividades de manutenção para as organizações e na necessidade da otimização de alocação dos recursos, uma vez que pequenas melhorias no gerenciamento destas atividades podem proporcionar economia de escala (BOUVARD *et al.*, 2011, JONGE; SCARF, 2020). De forma mais específica, a definição de um

cronograma das atividades de manutenção dinâmico indica a oportunidade de se definir o momento ideal das ações de manutenção uma vez que oportunidades surgem ao longo da execução do plano, evitando com que ocorram paradas excessivas e ações preventivas desnecessárias, gerando uma economia de custo total.

Com base nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de modelos que visam à otimização do planejamento de manutenção a fim de se obter um plano capaz de se adequar as necessidades reais da organização com um custo econômico, ao evitar manutenções excessivas e inadequadas como também, aproveitar o custo de parada de produção para a execução de intervenções em equipamentos inter-relacionados.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e objetivos específicos deste trabalho são apresentados nos itens a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo dinâmico para definição do cronograma de atividades de manutenção. O modelo desenvolvido tem como proposta acompanhar as mudanças que ocorrem durante a execução do plano, a fim de gerar uma economia de custo total ao aproveitar o custo de parada de produção.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Identificar a aplicação de metodologias e modelos que abordam o problema de otimização no planejamento das atividades de manutenção;
- Aplicar o modelo proposto em uma indústria de cloro e derivados;
- Realizar uma análise crítica dos resultados obtidos com a aplicação do modelo proposto;
- Apontar questionamentos e melhorias que podem ser implementadas no modelo proposto.

1.2.3 Estrutura Metodológica

A metodologia aplicada nesse trabalho consiste em uma pesquisa de natureza qualitativa e quantitativa, uma vez que um modelo matemático é desenvolvido e aplicado (MIGUEL et al., 2012). O procedimento técnico utilizado é a pesquisa bibliográfica, com finalidade de conhecer o assunto abordado por meio do levantamento bibliográfico, identificação de trabalhos e modelos de interesse a partir da literatura (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Com base nos conceitos e modelos de referência, o modelo proposto foi construído por meio de uma abordagem interativa, onde foram realizadas simulações e a aplicação do modelo. Por conveniência, a operacionalização do modelo proposto foi desenvolvida com auxílio de planilhas do Microsoft Excel. Por fim, os resultados obtidos serviram de base para análise, discussões e propostas de melhorias.

Desta forma, a metodologia deste trabalho foi composta pelas seguintes etapas: fundamentação teórica e revisão bibliográfica, construção do modelo proposto, validação do modelo, análise e discussão dos resultados conforme apresentado na Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Estrutura Metodológica

Etapa	Descrição Sintética
Etapa 1 Fundamentação	Referencial teórico e levantamento de modelos de manutenção para fundamentação teórica do estudo
Etapa 2 Construção do Modelo	Elaboração do modelo dinâmico proposto que visa atualizar o cronograma das atividades de manutenção conforme novos eventos acontecem ao longo de sua execução
Etapa 3 Validação do Modelo	Aplicação do modelo proposto em uma indústria de cloro e derivados
Etapa 4 Discussão dos Resultados	Análise e reflexões sobre os resultados obtidos, potenciais contribuições, limitações e possibilidades de evolução do modelo

Fonte: A autora (2021)

1.2.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho está estruturado em quatro capítulos:

- O Capítulo I, a Introdução, que apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do modelo proposto, e os objetivos da pesquisa.
- O Capítulo II, o Referencial Teórico e Revisão da Literatura, onde é desenvolvido a fundamentação teórica, incorporando conceitos relacionados a gestão e planejamento da manutenção, as atividades envolvidas na manutenção, e o cronograma das atividades de manutenção. Nesse capítulo, também é realizado uma revisão bibliográfica relativa a trabalhos relacionados à modelos de apoio gerencial na manutenção.
- O Capítulo III, Modelo Proposto, apresenta o modelo dinâmico para ajuste do cronograma das atividades de manutenção, e uma aplicação numérica para validação e avaliação do modelo proposto.
- Por fim, no Capítulo IV, Conclusões e Trabalhos Futuros, são descritas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 BASE CONCEITUAL E REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo são apresentados conceitos necessários para a compreensão da atividade de gerenciamento de manutenção, plano de manutenção e as questões investigadas no presente trabalho. Como também, é apresentada uma revisão da literatura sobre temas correlatos ao abordado no presente trabalho.

2.1 BASE CONCEITUAL

A base conceitual utilizada para este trabalho é apresentada a seguir, onde são explorados conceitos relevantes à gestão da manutenção e planejamento das atividades.

2.1.1 Manutenção

A manutenção pode ser definida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, destinadas a manter ou restaurar o sistema em um estado que possa desempenhar uma função requerida, garantindo o cumprimento das metas de produção (DING; KAMARUDDIN, 2015, ZHAN; YANG, 2021). Segundo De Almeida et al. (2015), a manutenção consiste em conjunto de atividades que visa manter os níveis de desempenho necessários para garantir o cumprimento das metas de produção.

De acordo com Xenos (1998), o principal objetivo da prática de manutenção consiste em evitar a degradação dos equipamentos que pode se manifestar de diversas formas, desde a péssima aparência dos equipamentos até as perdas de desempenho, paradas da produção, má qualidade do produto ou poluição ambiental. Todas essas manifestações têm uma forte influência negativa na qualidade e produtividade de uma organização.

Os custos associados a manutenção podem chegar até 70% do gasto da produção ou mesmo superar o lucro líquido anual em muitos casos. No entanto, por maior que seja o montante de gastos, é impossível para as indústrias de manufatura abandonar a manutenção, sendo considerada uma atividade essencial para as atividades produtivas (DING; KAMARUDDIN, 2015, FERNÁNDEZ; MÁRQUEZ, 2009).

De acordo com Pinjela, Pintelona e Vereecke (2006), uma manutenção eficaz é aquela que se adapta às necessidades do negócio, ou seja, a definição das atividades de manutenção deve estar

alinhada aos elementos da estratégia de negócio e características do processo produtivo. Como também, é importante levar em consideração a eficiência da manutenção dentro do sistema e seu custo de sua operação (PALMER, 2005).

A crescente importância da manutenção tem gerado cada vez mais interesse no desenvolvimento e implementação de estratégias ótimas de manutenção, a fim de melhorar a confiabilidade dos sistemas, prevenir a ocorrência de falhas do sistema e reduzir os custos de manutenção de sistemas deteriorados (WANG, 2002). No entanto, definir a melhor estratégia para impulsionar as atividades de manutenção e garantir uma gestão eficaz e eficiente, integrada à estratégia corporativa, ainda é um grande desafio para as organizações (MISHRA; ANAND; KODALI, 2006).

2.1.2 Gestão da Manutenção

Gestão da manutenção consiste no conjunto de atividades adotadas no gerenciamento da parte técnica e do relacionamento na empresa, tratando dos processos que podem comprometer o funcionamento de um sistema, levando ao estado de falha. De modo geral, a gestão tem como objetivo organizar e conduzir a execução de tarefas, sendo assim, uma vez que o planejamento foi realizado, a gerência tem como tarefa garantir que ele seja realizado de maneira eficaz e eficiente (BEN-DAYA *et al*, 2009).

Segundo Marquez *et al.* (2009), o processo de gerenciamento da manutenção pode ser dividido em duas etapas: a definição da estratégia e sua implementação. Na primeira etapa, os objetivos de manutenção são definidos com base no plano de negócios da organização. Essa etapa determina o sucesso da manutenção e a eficácia da implementação dos planos de manutenção, programações, controles e melhorias. A segunda etapa do processo consiste na implementação da estratégia selecionada, e a capacidade da organização em lidar com o problema de implementação do gerenciamento irá permitir a diminuição do custo direto da manutenção.

2.1.3 Planejamento da Manutenção

Neste item, são abordadas a definição e função do planejamento dentro da gestão da manutenção, conceitos e atividades importantes associadas à prática de manutenção.

2.1.3.1 Definição e função

O planejamento da manutenção representa o processo pelo qual todos os elementos necessários para realizar as atividades de manutenção são determinados e preparados antes do início de sua execução (DAFFUAA; RAOUF, 2015). O planejamento da manutenção é uma estratégia de suma importância, pois contribui na eficiência da manutenção em relação ao tempo de improdutividade, ao envolver a identificação de itens e ferramentas necessárias para as atividades de manutenção, levando ao estabelecimento de políticas de manutenção (PALMER; 2005, DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

No planejamento de manutenção é definido o plano de manutenção, que consiste no conjunto estruturado de ações como a identificação das necessidades de suporte, recursos, procedimentos e gerenciamento necessário para sua realização (MÁRQUEZ, 2007). O conhecimento dessas características do sistema de manutenção fornece informações sobre como ele pode ser melhorado, permitindo a seleção de estratégias de manutenção para as oportunidades específicas de melhoria (PALMER, 2005).

Segundo De Almeida *et al.* (2015), o desafio da manutenção é estruturar esses procedimentos e atividades de manutenção a serem realizadas de forma que os objetivos estratégicos a eles associados sejam alcançados. Isso significa que os gestores devem planejar as ações de manutenção com esses objetivos em mente. De acordo com Márquez (2007), no escopo de um planejamento de manutenção eficiente, as seguintes perguntas devem ser respondidas corretamente:

- O que deve ser feito?
- Quando deve ser feito?
- Quais recursos devem ser empregados?

Sendo assim, um planejamento eficaz permite que os gestores tomem ações utilizando os equipamentos corretos, no momento certo e com as ferramentas adequadas (DE ALMEIDA *et al.*, 2015). Com o planejamento das atividades em mãos, é possível realizar o agendamento das atividades, que se trata da atribuição de tarefas a serem realizadas em um horário específico. Sendo assim, um bom planejamento é um pré-requisito para uma programação correta; entretanto, para

um planejamento bem-sucedido, o feedback da programação é necessário (DAFFUAA; RAOUF, 2015).

2.1.3.2 Modelos de Manutenção

O uso de modelos também se torna importante nessa etapa, pois podem auxiliar os tomadores de decisão no processo de se obter uma programação das atividades de manutenção que cumpra os requisitos da organização. Segundo Bouvard *et al.* (2011), um modelo de manutenção é composto por um modelo de comportamento de confiabilidade do sistema e por um modelo de política de manutenção, e tem como principal objetivo avaliar o custo geral da manutenção incorrido das decisões de manutenção.

Os modelos de manutenção podem ser distinguidos em dois tipos: estacionários e dinâmicos. Nos modelos estacionários, os planos de manutenção são gerados de acordo com regras estáticas, ou seja, todas as datas de manutenção são programadas em intervalos regulares. Já os modelos dinâmicos incorporam informações dinamicamente de curto prazo, como falhas inesperadas de componentes, fornecendo uma programação de manutenção dinâmica que mudam ao longo do horizonte de planejamento.

Na construção de um modelo de manutenção, também é importante levar em consideração as características do sistema, isso porque em sistemas com vários componentes, as interações entre eles complicam a modelagem e a otimização da manutenção. Uma vez que, as interações entre os componentes do sistema proporcionam oportunidades de manutenção, que podem resultar em uma economia de custos ao realizar a manutenção desses componentes em conjunto (NICOLAI; DEKKER, 2008). Na seção 2.1.3.5, são abordadas as possíveis interações entre os componentes de um sistema e suas implicações.

2.1.3.3 Políticas de manutenção

Na literatura, existem diversas maneiras de classificar as atividades de manutenção. De modo geral, são divididas em duas categorias: manutenção planejada e não planejada. Na manutenção planejada, todos os recursos necessários para a realização das tarefas são pré-planejados e estão disponíveis, e a sua execução segue um cronograma pré-definido. Na manutenção não planejada,

pode haver um conjunto de instruções padrão disponível, entretanto, não atende aos critérios pré-planejados e pré-programados (DAFFUAA; RAOUF, 2015).

As atividades de manutenção programadas consistem nas ações de manutenção preventiva, e as atividades não programadas nas ações de manutenção corretiva. A manutenção corretiva são as atividades realizadas após a ocorrência de uma falha em um sistema ou componente, enquanto a manutenção preventiva visa eliminar ou reduzir as probabilidades de falhas por meio da manutenção em intervalos programados (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002). Como um aprimoramento da manutenção preventiva, tem-se a manutenção preditiva, que consiste na atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, identificados por meio do monitoramento da condição do equipamento (KARDEC; NASCIF, 2009).

Cada uma dessas abordagens é adequada para distintas situações, em grande maioria, as operações produtivas adotam uma combinação entre elas. E a forma como essas abordagens são aplicadas determina as políticas básicas de manutenção, que combinadas resultam no plano de manutenção dos ativos (WAEYENBERGH; PINTELON, 2004).

A adoção de uma política de manutenção adequada e otimizada é necessária para o gerenciamento da manutenção na realização de todas as atividades para gerar uma economia de custos significativa. Sendo assim, uma política de manutenção ótima é capaz de fornecer um plano de ações incorporado ao conjunto de regras usadas para orientar o gerenciamento na condução de uma manutenção eficaz (DING; KAMARUDDIN, 2015).

2.1.3.4 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva consiste na prática de intervenções após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida (ABNT, 1994). Nesse sentido, a manutenção corretiva é uma intervenção necessária imediatamente para evitar graves consequências aos componentes de produção, à segurança do trabalhador ou ao meio ambiente (VIANA, 2002).

A manutenção corretiva pode ser uma ação planejada ou não. A manutenção corretiva não planejada, ou emergencial, consiste na correção a falha de maneira improvisada. Geralmente, implica altos custos, uma vez que a quebra inesperada pode acarretar perdas de produção, qualidade

do produto e elevados custos indiretos de manutenção. A manutenção corretiva planejada consiste na correção do desempenho menor ou da falha por decisão gerencial, que se baseia na modificação dos parâmetros de condição observados no equipamento (KARDEC; NASCIF, 2009).

De modo geral, uma estratégia de manutenção corretiva trata principalmente de sistemas pequenos e sem importância, com medidas de manutenção sendo iniciadas somente após a ocorrência de uma falha no sistema. Essa abordagem costuma se mostrar prejudicial e antieconômica, uma vez que além dos custos gerados pela manutenção, têm-se os custos resultantes da parada de produção (ZHANG et al, 2017).

2.1.3.5 Manutenção preventiva

Segundo a ABNT (1994), a manutenção preventiva é efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, sendo destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. Refere-se ao trabalho de manutenção executado com planejamento, previsão, controle e registros antecipados, sendo realizada para garantir a disponibilidade e confiabilidade do equipamento (DAFFUAA; RAOUF, 2015).

A manutenção preventiva tenta determinar uma série de verificações, substituições e/ou revisões dos componentes com uma frequência relacionada à taxa de falha, sendo eficaz para superar problemas associados ao desgaste dos componentes. Suas ações são baseadas nas características de confiabilidade dos componentes, sendo possível analisar o comportamento da máquina e definir um programa de manutenção periódico (BEVILACQUA; BRAGLIA, 2000).

Segundo Daffua e Raouf (2015), na manutenção preventiva, se a probabilidade de uma falha aumentar gradualmente com o tempo, idade ou uso, as tarefas de manutenção são definidas com base no tempo. E as tarefas de manutenção são definidas com base nas condições, se a probabilidade de uma falha for constante, independentemente do tempo, idade ou uso, e houver uma degradação gradual desde o início da falha. De acordo com Xenos (2004), a prática da manutenção preventiva baseada na condição normalmente é conhecida como manutenção preditiva, que surgir como uma melhoria da manutenção preventiva, sendo uma prática de manutenção programada que também busca evitar a falha de um equipamento.

A prática da manutenção preventiva é mais vantajosa quanto maior for a simplicidade na reposição, quanto mais altos forem os custos das falhas e prejudicarem a produção e a segurança pessoal (KARDEC; NASCIF, 2009). É especialmente adotada em situações em que a ocorrência de uma falha pode ser perigosa e cara, possibilitando a redução de custos de manutenção e melhorando a eficácia da produção (ZHANG; ZENG, 2015). Entretanto, a prática da manutenção preventiva em excesso poder resultar em altos custos de manutenção, paradas no processo e reparos excessivos ou insuficientes ZHANG et al, 2017).

2.1.3.6 Sistemas multicomponentes

De modo geral, os equipamentos nunca funcionam de maneira isolada, e a operação e manutenção deles dependem, em maior ou menor número, da operação e manutenção de outras unidades. Ao planejar as atividades de manutenção, é possível ignorar essas dependências ou levar em consideração quando se deseja analisar critérios de otimização ao especificar políticas de manutenção, como por exemplo, a diminuição da taxa de custos, ou a maximização do tempo de produtividade (JONGE; SCARF, 2020)

Entretanto, a complexidade dos sistemas industriais está sempre aumentando, o que introduz muitas interdependências entre os componentes pertencentes a ele. Negligenciar essas interdependências resulta em uma manutenção ineficiente, podendo gerar, por exemplo, aumento dos custos de manutenção e tempo de inatividade. Em sistemas multicomponentes, as políticas de manutenção devem ser adaptadas para levar em consideração essas interações entre os componentes, que podem ou não depender um do outro dentro do processo (HORENBEEK; PINTELON, 2013).

A modelagem e a compreensão dessas interações representam um desafio significativo na manutenção, ao determinar as atividades de um sistema, não apenas a degradação de um único componente deve ser considerada, como também toda a estrutura do sistema e o impacto que a execução da manutenção causa sobre o sistema como um todo. (XIA et al, 2012). Sendo assim, em sistemas com muitos componentes, que podem ou não depender um do outro, as interações entre eles complicam a modelagem e a otimização da manutenção. Por outro lado, essas interações

também oferecem oportunidades de manutenção em grupo, que pode gerar uma economia de custos (NICOLAI; DEKKER, 2008).

De acordo com Jonge e Scarf (2020), as interações entre os componentes podem ser classificadas em três tipos de dependências: econômica, estrutural ou estocástica. A dependência econômica ocorre quando o custo de manutenção ou inspeção de várias unidades simultaneamente é diferente do custo quando realizada separadamente, por exemplo, devido a um custo fixo de instalação. A dependência estrutural se aplica aos componentes que formam estruturalmente uma parte, de modo que a manutenção de um componente com falha implica na manutenção de outros, ou o desempenho do sistema depende da configuração de suas unidades em conjunto. Por fim, a dependência estocástica se aplica quando os processos de deterioração ou tempo de falhas de uma unidade influencia na distribuição do tempo de vida de outras.

Em sistemas multicomponentes, a identificação das dependências entre os componentes é de suma importância na definição das políticas de manutenção, visto que é possível gerar uma economia ao realizar a manutenção sempre que surgir uma oportunidade de reparo. Por exemplo, quando ocorre uma falha em um componente e o sistema deve ser desligado para realizar a ação de reparo, o tempo de manutenção para as outras unidades pode ser antecipado com o intuito de maximizar a utilidade do custo fixo do tempo de inatividade. Esse tipo de estratégia, é denominada manutenção oportuna, que busca aproveitar a dependência do sistema para melhorar a disponibilidade e reduzir os custos de manutenção (ZHANG et al, 2017).

2.1.3.7 Manutenção oportuna

A manutenção oportuna é considerada um método sistemático de coleta, investigação, planejamento e execução de um conjunto de tarefas de manutenção quando houver uma falha não programada no sistema ou uma oportunidade de reparo (SAMHOURI, 2009). Em sistemas multicomponentes, a manutenção oportuna é uma estratégia útil para as abordagens de planejamento, onde grupos de atividades de manutenção são executados simultaneamente, não apenas para reduzir os custos de manutenção, como também aumentar a disponibilidade da planta (ZHANG; ZENG, 2015).

A manutenção oportuna é aplicada a sistemas de múltiplos componentes e muitas vezes é descrita como uma combinação de ações de manutenção corretiva e preventiva (CAVALCANTE; LOPES, 2015). Do ponto de vista prático, a política de manutenção oportunista é muito importante porque a maioria dos sistemas são compostos por múltiplos componentes que frequentemente incluem dependências entre si. Nesse contexto, a manutenção oportuna surge como uma oportunidade de otimizar a manutenção de um ou mais componentes por meio de paradas, planejadas ou não, ou da identificação de oportunidades em práticas de inspeção.

Essas oportunidades surgem de fatores econômicos e dependências estruturais entre os componentes do sistema, podendo estar relacionadas a uma manutenção em outro equipamento ou desligamento da planta (CAVALCANTE; LOPES; SCARF, 2018). Como por exemplo, uma oportunidade pode surgir quando um componente está sujeito a uma ação de manutenção preventiva ou corretiva, provocando a parada da planta e resultando na oportunidade de realizar a manutenção nos demais componentes do sistema.

De modo geral, a manutenção oportuna refere-se à situação em que a manutenção preventiva é realizada decorrente de oportunidades relacionadas com a escolha de uma data ou condicionantes pela impossibilidade de postergação, quando ocorre um evento de avaria. Devido a economias de escala nos custos de manutenção, uma falha em componente pode ser considerada uma oportunidade para a manutenção preventiva em outros componentes, principalmente quando o reparo de um componente requer a desmontagem ou parada de todo um sistema. Desta forma, combinar um reparo corretivo de um componente com o reparo preventivo dos demais componentes pode ser lucrativo para a manutenção (DE ALMEIDA et al., 2015).

Em respeito à otimização de manutenção, a manutenção oportunista é uma das abordagens mais populares (VU et al., 2020), pois parte da ideia de otimizar o uso de recursos devido ao seu grande potencial da economia de escala. Sendo assim, em modelos de manutenção, a identificação dessas oportunidades auxilia na obtenção da política de manutenção ótima, uma vez que em sistema onde existe dependência, as decisões de manutenção não serão independentes, e a ação de manutenção ideal para um determinado subsistema dependerá dos estados de todos os outros subsistemas do sistema (WANG, 2002).

No framework de situações dinâmicas, os períodos de inatividade do sistema são considerados como oportunidades interessantes para a realização de atividades de manutenção, uma vez que os custos de manutenção podem ser reduzidos, especialmente em situações em que uma falha resulta em um tempo de inatividade do sistema (VAN *et al.*, 2013).

2.1.4 Modelos dinâmicos de manutenção

Forrester (1958) apresentou a ideia de sistemas dinâmicos como uma metodologia na qual a simulação e a modelagem auxiliam problemas de gerenciamento para tomada de decisão, onde é possível analisar a causa e efeitos das interações entre os elementos decisivos da problemática. No contexto da manutenção, modelos dinâmicos usam características de confiabilidade a priori dos componentes para atualizar o planejamento de manutenção a cada momento de decisão. Podendo incorporar informações sobre componentes, como idade dos componentes, o uso do componente ou uma falha detectada (BOUVARD *et al.*, 2011).

Em abordagens estáticas, a programação das atividades de manutenção é definida com base em regras estáticas que não mudam ao longo do planejamento, podendo resultar em práticas de manutenção excessivas e inadequadas (XIA *et al.*, 2012). Em contrapartida, abordagens dinâmicas levam em consideração eventos coexistentes de manutenção devido ao funcionamento constante da produção. Em situações reais, a dinâmica do processo é capaz de afetar a condição dos componentes e conseqüentemente os cronogramas de manutenção, resultando na necessidade de incorporar informações atuais para se obter uma programação de manutenção dinâmica ao invés de uma fixa baseada nas informações do projeto (LIU *et al.*, 2016).

2.2 REVISÃO DA LITERATURA

Nos últimos anos, diversos estudos têm enfatizado a aplicação de metodologias e modelos relacionados ao planejamento da manutenção, com a proposta de otimizar os processos associados as atividades de manutenção. Nesse contexto Salah, Osman e Hosny (2018) apresentaram uma abordagem de manutenção centrada na confiabilidade (RCM) combinada com um algoritmo evolutivo para o desenvolvimento de planos de manutenção para instalações hospitalares,

entretanto, o estudo foi limitado pela falta de disponibilidade de dados históricos e a incapacidade do modelo de considerar a redundância do sistema.

No estudo de Dhatrak, Vemuri e Gao (2020), foi apresentado um modelo de programação linear inteira mista em busca de otimizar o planejamento da manutenção, ao propor a maximização da condição média dos sistemas de infraestrutura ao longo do horizonte de planejamento. No modelo proposto, os autores consideraram o efeito da propagação da deterioração para complementar a suposição do processo de deterioração tradicional, como também levam em consideração as restrições de que uma porcentagem do sistema precisa estar em bom estado. Uma limitação da formulação do modelo é que o tempo de resolução do problema cresce exponencialmente à medida que aumenta o número de instalações, para contornar esse problema foi proposto um algoritmo heurístico.

Verbert, De Schutter e Babuska (2017) apresentaram uma abordagem de dois estágios para o planejamento da manutenção oportuna em sistemas de múltiplos componentes. No primeiro estágio do modelo, é determinada para cada componente a estratégia de planejamento mais adequada, possibilitando a tomada de decisões em situações específicas. No segundo estágio, o plano de manutenção é otimizado no nível de sistema, onde é considerada a dependência econômica e estrutural dos componentes além das restrições orçamentárias, com o objetivo de minimizar os custos totais por meio da disseminação ou combinação das atividades de manutenção.

Outros trabalhos apresentaram metodologias que visam otimizar a programação das atividades de manutenção com base em um plano de manutenção dinâmico. Horenbeek e Pintelon (2013) apresentam uma política de manutenção preditiva dinâmica para sistemas multicomponentes com base em informações prognósticas, considerando as diferentes dependências entre os componentes. O modelo proposto consiste em um plano de manutenção estático de longo prazo e na atualização desse plano em intervalos regulares de tempo, incorporando um planejamento dinâmico de curto prazo com as novas informações de degradação e vida útil remanescente dos componentes. Para levar em consideração as interdependências entre os componentes no modelo, o agrupamento das ações de manutenção é considerado a fim de encontrar uma política de manutenção ótima com um custo econômico.

Bouvard *et al.* (2011) também apresentam um modelo de otimização de planejamento de manutenção dinâmico em um sistema multicomponente, com objetivo de programar as operações de manutenção com base em uma abordagem adaptativa, ao mesmo tempo em que incorpora outras restrições operacionais de negócios. No método desenvolvido, as informações de monitoramento de condição são utilizadas como regra de decisão de agrupamento de manutenção dinâmica, com o intuito de otimizar os custos de manutenção em um horizonte contínuo. Por meio de exemplos numéricos, é demonstrado que esta abordagem permite economias de custos que justificam a decisão de investir em dispositivos e sistema de monitoramento de condição, e a adoção de planos de manutenção mais dinâmicos.

Liu *et al.* (2016) também propõem um modelo capaz de integrar as informações do processo em tempo real e as qualidades das peças para se obter um plano de manutenção dinâmico com um custo mínimo. O método proposto incorporou resultados monitorados de peças de entrada, análise teórica do desgaste do pino e o efeito das variações das peças de entrada na taxa de desgaste. O efeito de diferentes parâmetros dinâmicos no cronograma de manutenção foi analisado e apresentado em três estudos de casos. Em comparação com os cronogramas fixos tradicionais, o modelo apresentado fornece um esquema de manutenção baseado em condições e evita a manutenção inadequada.

Uma estratégia de manutenção preventiva oportunista multinível é apresentada por Sarker e Faiz (2016), ao propor um modelo de minimização dos custos de manutenção para componentes de turbinas eólicas, onde as atividades de manutenção ocorrem em virtude de uma falha em qualquer componente. O modelo busca identificar o número ideal de faixas etárias que apresenta o menor custo de manutenção, uma vez que ao realizar a manutenção dentro de uma faixa etária o componente sofre um determinado nível de depreciação, e os custos de manutenção são afetados pelos limites de idade máximo e mínimo definidos para os componentes. Entretanto, os autores utilizaram as mesmas porcentagens para determinar os limites e grupos de idade, sem considerar as particularidades de componentes com idade de falha variada. No estudo, também foi desconsiderado o tempo necessário para a realização das tarefas de manutenção.

Zhu, Xiang e Zeng (2021) desenvolveram um modelo de otimização da manutenção para sistemas multicomponentes com dependência econômica ao longo de um horizonte de tempo rolante, com o objetivo de minimizar o custo total da manutenção. O problema foi formulado com um modelo estocástico de Programação linear inteira, onde os autores não restringiram os tipos de atividade de manutenção que podem ser agrupadas ou quando o agrupamento das atividades deve ocorrer. Os resultados obtidos com a aplicação numérica superaram significativamente quando comparados com a abordagem de programação dinâmica e uma política estrutural. Entretanto, o trabalho se limitou a sistemas mais simples e considerou apenas a dependência econômica dos componentes.

Alguns estudos desenvolveram modelos que buscam definir o tempo ideal de intervalo entre as ações de manutenção considerando as restrições do sistema, como Phan e Zhu (2015) que apresentam um modelo de otimização múltiplos estágios para determinar intervalos de inspeção periódica para sistemas de infraestrutura geodistribuída. Eles formularam um problema com base no custo esperado por ciclo, para definir o cronograma de inspeções para o sistema que minimize o custo total de inspeção e manutenção, e satisfaça as restrições de força de trabalho e recursos orçamentários.

No modelo proposto por Zhang e Zeng (2017), as atividades de manutenção e os pedidos de peças sobressalentes são determinados de acordo com os requisitos de manutenção e o estado do estoque. Os autores investigam a otimização conjunta da estratégia de manutenção preventiva oportunística baseada na condição periódica e uma política de segurança para o fornecimento de peças sobressalentes para sistemas com múltiplos componentes. É formulado um modelo de taxa de custo de longo prazo a fim de determinar a estratégia ótima conjunta, com base na teoria do processo semi-regenerativo, apresentando os benefícios da otimização da manutenção e políticas de estoque de sobressalentes em conjunto. Entretanto, o modelo apresenta algumas limitações ao não considerar o tempo de manutenção e a manutenção imperfeita.

Zhao *et al.* (2021), apresentam um modelo de agendamento integrado de serviços de manutenção, reparo e operação (MRO) para equipamentos complexos, em que diversos processos de serviços, equipes e recursos materiais são considerados. Integrando a alocação dos recursos e a

programação das tarefas de modo a obter a solução ideal com menor makespan, menor consumo de recursos e menor custo. Fatores mais práticos podem ser considerados no modelo, como a relação inerente entre níveis de habilidade e tempo de serviço, bem como tipos específicos de custos, para fornecer resultados mais realistas para o problema de programação integrada de recursos de serviço de MRO.

A revisão da literatura possibilitou identificar a aplicação de diferentes modelos que abordam o problema de otimização do planejamento das atividades de manutenção, no que diz respeito a definição do cronograma de manutenção. Como também, por meio da revisão dos modelos presentes na literatura, foi possível identificar os principais componentes do modelo a ser desenvolvido, destacando os pontos que serão investigados e esclarecidos por meio da pesquisa, sendo estes:

a) Plano de manutenção:

- Identificação dos sistemas, componentes e suas relações;
- Identificação das necessidades e atividades da manutenção;
- Identificação da periodicidade das atividades de manutenção;
- Definição do cronograma de manutenção.

b) Cronograma dinâmico:

- Definição das oportunidades consideradas no sistema;
- Identificação dos componentes críticos do sistema;
- Identificação das dependências entre os componentes;
- Definição dos critérios, variáveis e métodos de decisão e análise das oportunidades;

Diante disso, fica evidente a necessidade das organizações em adotar um gerenciamento eficiente das atividades de manutenção, ao definir um cronograma dinâmico que responda as mudanças que ocorrem ao longo de sua execução, que surgem como oportunidades de manutenção ao reduzir custos e tempo de improdutividade do sistema. Este trabalho se propõe estruturar um modelo de apoio à tomada de decisão gerencial para auxiliar na definição do cronograma de manutenção mais adequado, visando a redução do tempo de improdutividade do sistema.

3 MODELO PROPOSTO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a estruturação do modelo dinâmico do plano de manutenção, o qual foi desenvolvido pela autora dessa dissertação e publicado em Ribeiro e Costa (2021). Como também, é apresentada uma aplicação do modelo proposto. Por fim, algumas extensões que podem ser agregadas na estrutura do modelo.

3.1 ESTRUTURA DO MODELO

De acordo com Uysal e Tosun (2012), a prática da manutenção bem-sucedida depende muito de um gerenciamento de informação eficaz, com a coleta, análise e transformação dos dados em informações para fornecer relatórios e feedbacks para apoiar a tomada de decisão. Nesse contexto, sistemas de gestão de manutenção tem como papel fundamental disponibilizar ferramentas que possam auxiliar os gestores no gerenciamento das atividades de manutenção.

Por meio dos dados fornecidos, os sistemas são capazes de controlar as atividades de trabalho e os recursos necessários, bem como monitorar e relatar a execução do trabalho (FERNADEZ et al., 2003). De maneira específica, os sistemas são capazes de auxiliar o gerenciamento das atividades corretivas, com base no registro das ocorrências e ordens de serviços, e as atividades preventivas, por meio do cadastro das atividades de manutenção e definição de periodicidade.

A programação das atividades preventivas deve ser efetuada com base nas regras de manutenção definidas pela gestão, isso porque as atividades podem ser programadas para um determinado equipamento ou conjunto de equipamentos que pertencem à mesma categoria. O gestor também deve estabelecer a definição da periodicidade, em que o equipamento deve receber a manutenção, com base nas informações dos fornecedores, ou por meio de dados históricos com auxílio do sistema, por exemplo, com a aplicação do modelo de substituição por idade. Como resultado, os sistemas são capazes de fornecer um plano de manutenção a longo prazo para as atividades de manutenção programadas.

Na prática, não é incomum que mesmo quando ocorram falhas em um sistema físico, seu plano de manutenção siga inalterado, fazendo com que um equipamento que acabou de passar por

uma manutenção corretiva esteja sujeito a uma outra ação de manutenção. Como também, quando ocorre uma falha ou o equipamento possui uma manutenção preventiva agendada, causando uma parada do sistema, os demais equipamentos podem estar sujeitos a manutenção oportuna, o que também não é levado em consideração em muitas situações. A proposta desse trabalho é agregar ao modelo a dinâmica na definição do cronograma de atividades, de modo que ao serem registradas novas informações de falhas e intervenções de manutenção, o modelo seja capaz de identificar as oportunidades resultantes dessa falha ou manutenção.

No desenvolvimento desse trabalho, duas oportunidades de manutenção no equipamento são levadas em consideração, uma delas é gerada por meio de uma falha no próprio equipamento, onde a manutenção é realizada e, quando necessário, as demais atividades de manutenção programadas são reajustadas. E a outra ocorre devido a uma falha ou atividade de manutenção em um equipamento que resulta na parada do sistema, ocasionando na oportunidade de realizar manutenções nos demais equipamentos que fazem parte do mesmo sistema.

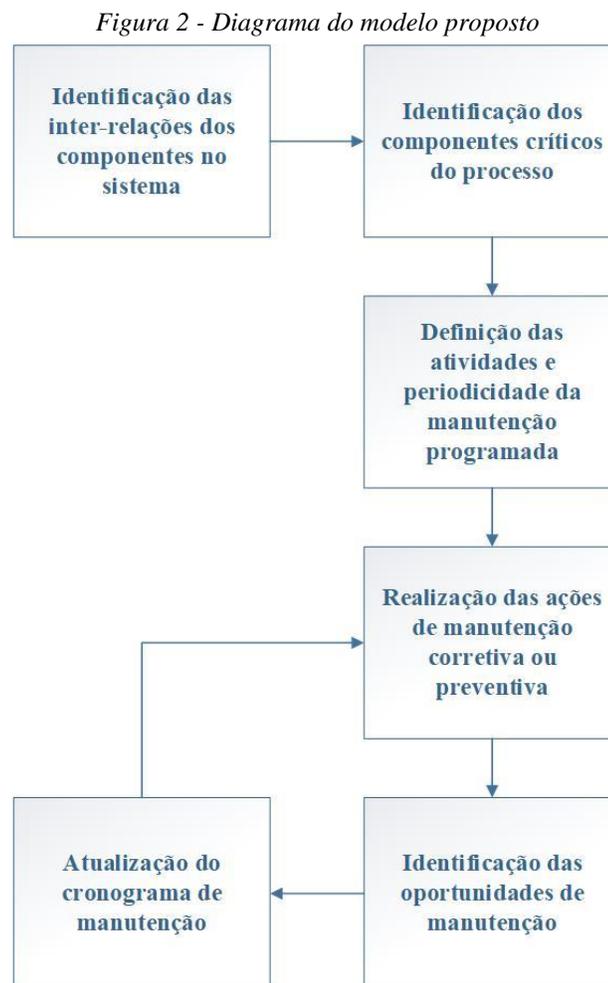
Para identificar as oportunidades, é necessário realizar o mapeamento dos equipamentos que se inter-relacionam, isso porque a parada de um equipamento pode ou não gerar uma oportunidade a outros equipamentos, tal fato vai depender de quais equipamentos fazem parte do mesmo sistema. Sendo assim, a identificação das dependências entre os equipamentos irá indicar quais oportunidades surgem durante a execução do plano, visto que um equipamento pode impactar apenas uma parcela dos equipamentos cadastrados no sistema.

A identificação da oportunidade é feita com base no impacto econômico a partir das informações fornecidas pelo decisor ao sistema. O modelo irá identificar as ocorrências de paradas e registros de manutenção, toda vez que uma nova informação for inserida no sistema, e ajustar o cronograma das atividades cadastradas quando necessário. Logo, a verificação do modelo desenvolvido será executada em diferentes momentos de decisão:

1. Quando um equipamento falha e uma ação corretiva é necessária. O decisor identifica e registra a falha, o modelo recebe essa informação, define os outros equipamentos que estão sujeitos a manutenção oportuna durante esse tempo de inatividade, calcula o próximo tempo de ação preventiva para os respectivos equipamentos, e atualiza o cronograma de manutenção;

2. Quando ocorre uma ação preventiva programada. O conjunto de equipamentos sujeitos a manutenção preventiva foi definido previamente no desenvolvimento do plano, entretanto, com os ajustes que o plano sofre ao longo de sua execução, oportunidades de manutenção podem ser identificadas nesses momentos. Logo, quando o decisor registra a informação de execução da manutenção programada, o modelo verifica a existência de oportunidades, define quais equipamentos estão sujeitos, e calcula novamente o período da manutenção programada.

O modelo proposto no presente trabalho segue a estrutura apresentada na Figura 2.



Fonte: A autora (2021)

Sendo assim, o decisor deve informar ao modelo os equipamentos que fazem parte do sistema e a inter-relações entre eles. Também deve fornecer as regras de manutenção e a periodicidade em que a manutenção deve ser realizada. Horenbeek e Pintelon (2013), Bouvard *et al.* (2011) e Liu *et al.* (2016) desenvolveram em seus trabalhos modelos dinâmicos do cronograma de manutenção, onde as informações de monitoramento de condição são utilizadas como regra de decisão na atualização do cronograma, entretanto, esses modelos se limitam a sistemas em que se tem disponível informações prognósticas do desempenho dos equipamentos.

Nesse trabalho, o modelo proposto irá calcular os limites da manutenção oportuna com base na periodicidade definida pelas regras de manutenção fornecidas pela gestão. Com base nisso, os limites da manutenção oportuna foram definidos de acordo com o modelo desenvolvido por Sarker e Faiz (2016), que forneceram limites fixos baseados em um percentual do tempo médio até falha de um componente, onde o limite mínimo e máximo correspondem, respectivamente, a 50% e 95% do tempo médio até a falha.

Após a criação do plano de manutenção anual, ao ocorrerem novos eventos de manutenção, o modelo verifica a possibilidade de remanejar atividades de manutenção, caso seja possível, o cronograma é atualizado. As seguintes seções apresentam as premissas que foram adotadas neste trabalho, e a lógica por trás da manutenção oportuna e dinâmica do modelo.

3.1.1 Premissas do modelo

Devido à complexidade do sistema de manutenção, existem algumas premissas relacionadas ao desenvolvimento do modelo proposto, conforme apresentado abaixo:

Premissa 1: No modelo são considerados sistemas com várias unidades, onde cada unidade representa um equipamento ou componente. As unidades presentes no sistema são dependentes entre si, e a parada em uma unidade implica na parada do subsistema ou sistema em que a unidade está inserida.

Premissa 2: Cada unidade ou conjunto de unidades, possui seu próprio processo de deterioração e periodicidade de manutenção que são independentes entre si. A periodicidade será definida pelo decisor ao definir a regra de manutenção.

Premissa 3: As ações de manutenção no modelo são consideradas idênticas e perfeitas, onde o item retorna à condição de “tão bom quanto novo” ao passar por uma intervenção de manutenção. O tempo de preparação das ações de manutenção é desprezado no modelo.

Premissa 4: As atividades de manutenção programada podem ser apenas realizadas mais cedo e combinadas com as atividades de manutenção dos itens que fazem parte do mesmo sistema.

Premissa 5: Todos os recursos necessários para atividades de manutenção estão disponíveis.

Premissa 6: Ao agrupar as atividades de manutenção, serão priorizadas as atividades que levam o mesmo ou menor tempo para serem executadas.

Premissa 7: Ao agrupar as atividades de manutenção, é levado em consideração o tempo disponível que a empresa possui para a realização das atividades em uma única parada.

Premissa 8: São consideradas como oportunidades de manutenção o momento em que o processo para devido a uma falha em uma unidade, ou devido a uma ação de manutenção preventiva programada.

Premissa 9: Os limites de periodicidade mínima e máxima para a realização da manutenção oportuna são fixos e pré-determinados.

Premissa 10: No início da execução do plano, todos os itens do sistema são considerados com idade igual a 0.

Premissa 11: É assumido como idade de um item o tempo desde o início de sua operação.

As seguintes notações são usadas neste trabalho:

- i representa o índice do equipamento;
- $x_i(t)$ representa a idade do equipamento i no momento t ;
- n_i representa o limite mínimo de idade calculado para o equipamento i receber a manutenção oportuna;
- N_i representa a idade em que o equipamento i está sujeito a manutenção preventiva;
- $x_i(f)$ representa a idade em que o equipamento i apresentou uma falha;
- $x'_i(t)$ representa a idade do equipamento i após receber uma ação de manutenção.⁴

3.1.2 Identificação das inter-relações dos componentes no sistema

Nessa etapa, após o levantamento de todos os equipamentos e/ou componentes que irão fazer parte do plano de manutenção, é feita a identificação das dependências entre eles. Como discutido anteriormente, em sistemas multicomponentes essa dependência pode ocorrer de maneira econômica, estrutural ou estocástica.

Na dependência econômica o custo associado a prática de manutenção de várias unidades simultaneamente é diferente do custo quando realizada separadamente, devido a um custo fixo de manutenção por exemplo. Na estrutural os componentes formam estruturalmente uma parte, de modo que a manutenção de um implique na manutenção dos demais. E por fim, na estocástica, os processos de deterioração ou tempo de falhas de um componente influencia na distribuição do tempo de vida dos demais.

Essa etapa de levantamento das inter-relações é de suma importância para a identificação das oportunidades no sistema, isso porque, nem sempre a parada de uma unidade irá influenciar na parada do sistema e criar oportunidades de manutenção nas demais. De modo geral, a identificação das inter-relações dos equipamentos está diretamente relacionada ao arranjo estrutural do sistema produtivo e ao processo produtivo em si, isso porque depende da configuração dos departamentos, centros de trabalho, equipamentos e, da movimentação do trabalho através do sistema. Sendo assim, a identificação e o tipo de dependência dos equipamentos vão depender da estrutura da organização e do processo produtivo em estudo.

3.1.3 Identificação dos componentes críticos do processo

A etapa da identificação dos componentes críticos do processo consiste no levantamento dos componentes que provocam a parada de todo o sistema (ou subsistema) no qual estão inseridos, uma vez que apresentam uma falha em seu desempenho. A identificação desses componentes está diretamente ligada a etapa anterior, isso porque na etapa de identificação das inter-relações dos componentes é feito o levantamento da dependência desses componentes, enquanto a identificação dos componentes críticos aponta qual(is) componente(s) provocam a parada do sistema como um todo, gerando os momentos oportunos para manutenção.

3.1.4 Definição das atividades de manutenção e periodicidade

Essa etapa consiste basicamente em determinar quais ações de manutenção serão realizadas, e se elas serão definidas a nível equipamento ou conjunto de equipamentos. Isso porque em diversos processos produtivos, encontram-se equipamentos idênticos que estão sujeitos a mesma prática de manutenção e até mesmo periodicidade.

Sendo assim, como entrada do planejamento, o gestor deve estabelecer o conjunto de ações de manutenção e a periodicidade em que elas irão ocorrer para um dado equipamento ou conjunto de equipamentos. A periodicidade pode ser definida com base nas informações dos fornecedores, ou por meio da análise de dados históricos, como por exemplo, um modelo de substituição por idade. Como resultado, o gestor tem o cronograma de manutenção a longo prazo para as atividades programadas.

Além disso, nessa etapa do planejamento, também são planejadas a prática das ações corretivas. Embora, elas sejam programadas, as ações corretivas também fazem parte do plano de manutenção. Isso porque, quando uma falha ocorre em um dado equipamento, o setor de manutenção deve estar preparado para corrigir essa falha o mais rápido possível.

3.1.5 Realização das ações de manutenção corretiva ou programada

Uma vez que o plano de manutenção está sendo executado, e conforme as atividades de manutenção são realizadas, tanto as atividades corretivas quanto as programadas, o gestor deve fornecer o registro dessas informações ao modelo, para que possam ser identificadas as oportunidades de manutenção e realizar a atualização do cronograma. Desse modo, toda vez que o gestor inserir uma nova informação de manutenção em um determinado componente(s) do sistema, o modelo deve atualizar o cronograma de manutenção de acordo com as oportunidades identificadas dentro do plano de manutenção. A lógica utilizada na atualização do modelo será apresentada na seção 3.1.7.

3.1.6 Identificação das oportunidades de manutenção

As oportunidades de manutenção consideradas nesse estudo ocorrem em duas situações distintas:

1. No momento em que um equipamento falha, estando sujeito a ação de manutenção, de forma que as próximas práticas de manutenção podem ser ajustadas seguindo o novo cronograma;

2. No momento em que um equipamento do sistema está sujeito a uma ação de manutenção planejada ou corretiva, ao aproveitar a parada do sistema, os demais equipamentos podem estar sujeitos a manutenção oportuna.

Para a definição da estratégia de manutenção, é necessário definir os limites máximos e mínimo em relação à idade ou periodicidade que o equipamento se encontra sujeito a manutenção programada. Os limites da manutenção oportuna foram considerados como uma porcentagem da idade da falha (ou periodicidade da manutenção) definida no plano de manutenção, com base na regra adotada por Sarker e Faiz (2016), onde o limite mínimo e máximo correspondem, respectivamente, a 55% e 95% da periodicidade definida para cada regra de manutenção.

Neste trabalho, optou-se por considerar o limite mínimo de 55%, e o limite máximo da manutenção oportuna como sendo a periodicidade definida no plano, ao atingir a idade máxima o equipamento já está sujeito a manutenção preventiva. Desta forma, a manutenção oportuna ocorre quando a idade $x_i(t)$ do equipamento i é maior ou igual a 55% da idade programada para manutenção preventiva N_i e menor que 100% da idade N_i da manutenção preventiva.

No início da execução do plano anual, todos os equipamentos são considerados com a idade igual a 0, denominada $x_i(0) = 0$, de forma que independente da ação de manutenção aplicada, ao passar por uma o equipamento retorna para idade igual a 0, uma vez que todas as ações de manutenção são consideradas iguais (retornam o equipamento ao estado de “tão bom quanto novo”). Os equipamentos com idade entre os limites mínimo e máximo definidos são submetidos às ações de manutenção preventiva, que são realizadas de maneira oportuna toda vez que houver uma parada no sistema.

Os equipamentos com idade acima do limite máximo são submetidos a manutenção preventiva programada, e os equipamentos com idade abaixo do limite mínimo são deixados como estão, sem nenhuma ação preventiva. Desta forma, considerando $x_i(0) \leq x_i(t)$ e $0 < n_i < N_i$, cada equipamento está sujeito as seguintes situações de manutenção:

i. Se um equipamento i do sistema apresentar uma falha no tempo t ou atingir a idade N_i , ele sofre uma ação de manutenção, e os demais equipamentos j do sistema que apresentarem a idade $x_j(t) = N_j$ estão sujeitos à manutenção preventiva;

ii. Se um equipamento do sistema apresentar uma falha no tempo t ou atingir a idade N_i , ele sofre uma ação de manutenção, e os demais equipamentos j do sistema que apresentarem a idade $x_j(t)$ entre n_j e N_j , estão sujeitos à manutenção oportuna;

iii. Caso contrário, se um equipamento do sistema apresentar uma falha no tempo t ou atingir a idade N_i , ele sofre uma ação de manutenção, e para os demais equipamentos j com a idade $x_j(t) < n_i$, nada é feito.

A proposta do modelo é que a primeira identificação das oportunidades seja realizada no momento que o gestor fornece o plano de manutenção anual. De forma que ao iniciar a execução do plano, o gestor já tenha em mãos um plano de manutenção atualizado com o mínimo de paradas programadas possível. E na medida em que as informações de ações corretivas forem agregadas ao modelo, o sistema irá fornecer uma nova atualização do cronograma de manutenção.

3.1.7 Atualização do cronograma de manutenção

Toda vez que uma nova informação de parada ou regra de manutenção for registrada, a verificação apresentada anteriormente é realizada, com o objetivo de fornecer ao usuário uma nova atualização do cronograma de atividades. Quando ocorre uma falha em um equipamento do sistema, esse equipamento é submetido a manutenção corretiva e os demais equipamentos qualificados são sujeitos a ação de manutenção preventiva oportunística. Após realizar as ações de manutenção corretiva e preventiva, e a informação ser inserida no modelo, as idades dos equipamentos são atualizadas de forma que:

i. O equipamento que apresenta uma falha no momento t , possui a idade denominada $x_i(f)$ no momento que a falha é identificada. Após passar pela manutenção corretiva, a idade do equipamento é zerada de forma que $x_i(t) = x_0 = 0$;

ii. O equipamento que passa pela manutenção preventiva ou oportuna na idade $x_i(t)$. Após sofrer a ação de manutenção, a idade do equipamento também é zerada de forma que a idade do equipamento após passar pela manutenção, $x'_i(t)$, seja igual a 0.

Sendo assim, de acordo com a periodicidade definida na regra de manutenção, o cronograma das atividades é reajustado. Após a falha de um equipamento na idade $x_i(f)$, a próxima data da atividade de manutenção programada será quando $x_i(f) + n_i < x'_i(t) \leq x_i(f) + N_i$, e as datas para as seguintes ações programadas também irão respeitar os limites de periodicidade definidos no plano para o determinado equipamento.

Para os equipamentos que foram submetidos a manutenção oportuna na idade $x_i(t)$, a próxima atividade de manutenção será programada quando $x_i(t) + n_i < x'_i(t) \leq x_i(t) + N_i$, e as programações seguintes também irão seguir os limites de periodicidade definidos no plano. De modo que o momento exato que cada ação de manutenção programada será executada vai depender das oportunidades de manutenção presentes ao longo da execução do plano.

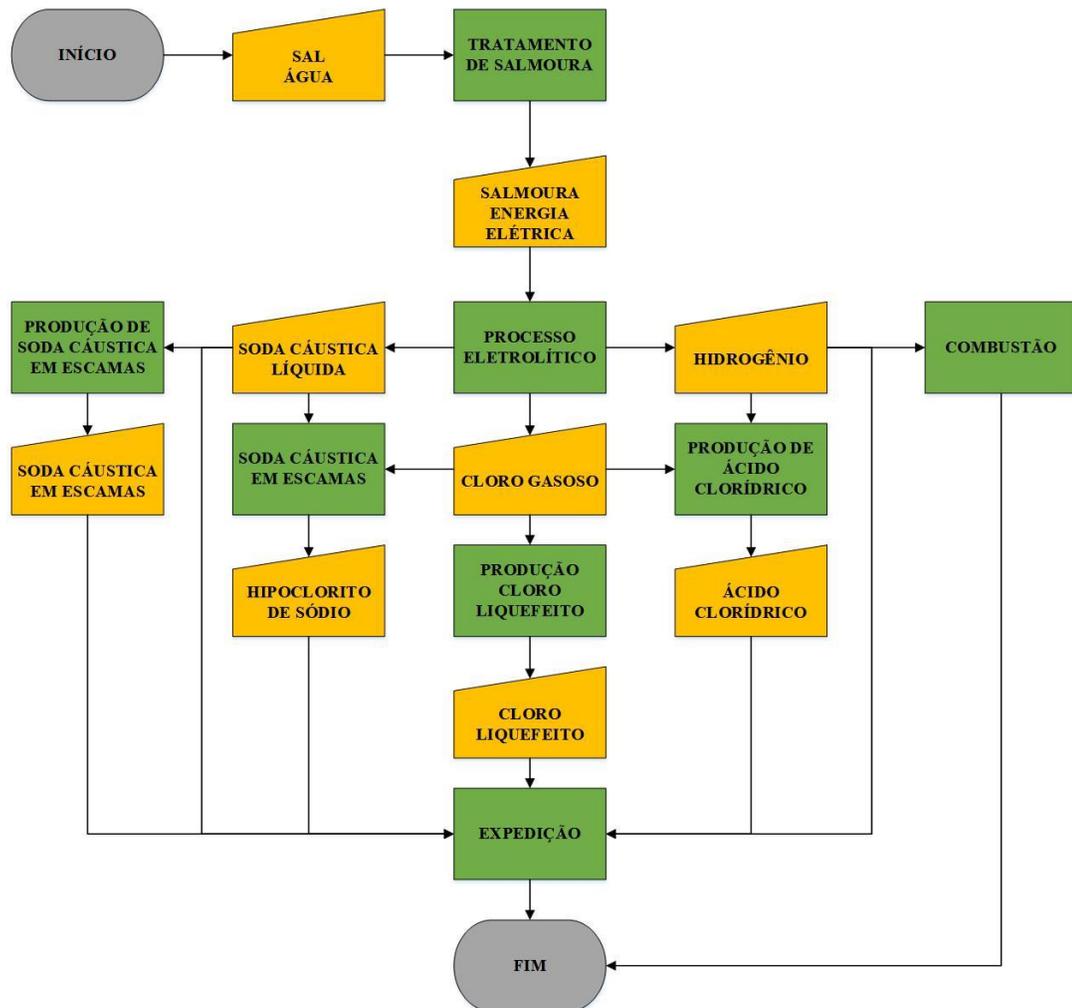
3.2 APLICAÇÃO DO MODELO

Com o objetivo de ilustrar o modelo proposto para o planejamento da manutenção, uma aplicação é apresentada. Esta aplicação apresenta uma situação definida por uma indústria de cloro e derivados do cloro e soda cáustica. O cloro e a soda são os principais produtos fornecidos pela empresa, tendo como produtos secundários o hidrogênio, hipoclorito de sódio e o ácido clorídrico, gerados a partir dos resíduos dos produtos principais.

A fábrica é composta por várias unidades, tendo como início do processo a saturação do cloreto de sódio, popularmente conhecido como salmoura, juntamente com a corrente elétrica e o ácido clorídrico passam pelo processo eletrolítico, onde é realizada a separação do hidrogênio, cloro gasoso e soda cáustica. A soda cáustica líquida passa pelo processo de produção de soda cáustica em escamas, o cloro gasoso entra como insumo nos processos de produção de hipoclorito de sódio, cloro liquefeito e ácido clorídrico, nesse último, com o hidrogênio também fazendo parte do processo conforme apresentado na Figura 3.

Para garantir um controle melhor da qualidade, segurança de equipamentos e pessoas, além do maior aproveitamento da continuidade dos processos, existem uma lista de instrumentos que devem ser mantidos em conformidades e devidamente calibrados. Para o controle e planejamento das ações de manutenções, a gerência segue um cronograma anual gerenciado pelo *software Isoplan 5.0*, que fornece e controla as datas de liberação das calibrações.

Figura 3 - Fluxo do processo



Fonte: A autora (2021)

As datas de liberação das calibrações para cada um dos itens são dinâmicas, de forma que a depender do momento em que item apresenta uma falha, a periodicidade da próxima calibração tende a reduzir. Isso porque o próprio sistema utilizado pela empresa considera a manutenção como imperfeita, e leva em consideração a depreciação do item ao definir a periodicidade da manutenção. Entretanto, como o modelo proposto neste trabalho não leva em consideração a depreciação dos equipamentos após sofrer uma ação de manutenção, a prática da manutenção foi considerada como perfeita, conforme apresentado na premissa 3.

Dos itens presentes na planta da fábrica, o gestor forneceu uma lista com os itens críticos que provocam a parada total da planta ou da unidade que estão inseridos, assim como o tempo de duração de cada manutenção, a periodicidade das calibrações definidas no plano e o limite da manutenção oportuna, conforme apresentado na Tabela 1. A periodicidade das atividades de manutenção preventiva para os itens é definida com base nas condições que o item se encontra na última calibração. Entretanto, como premissa do modelo, a depreciação dos itens não é levada em consideração visto que a manutenção é considerada como perfeita. Sendo assim, foi assumida como periodicidade da manutenção, a última periodicidade definida no plano fornecido pelo *software*.

Tabela 1 - Duração e periodicidade da manutenção para os itens críticos do processo

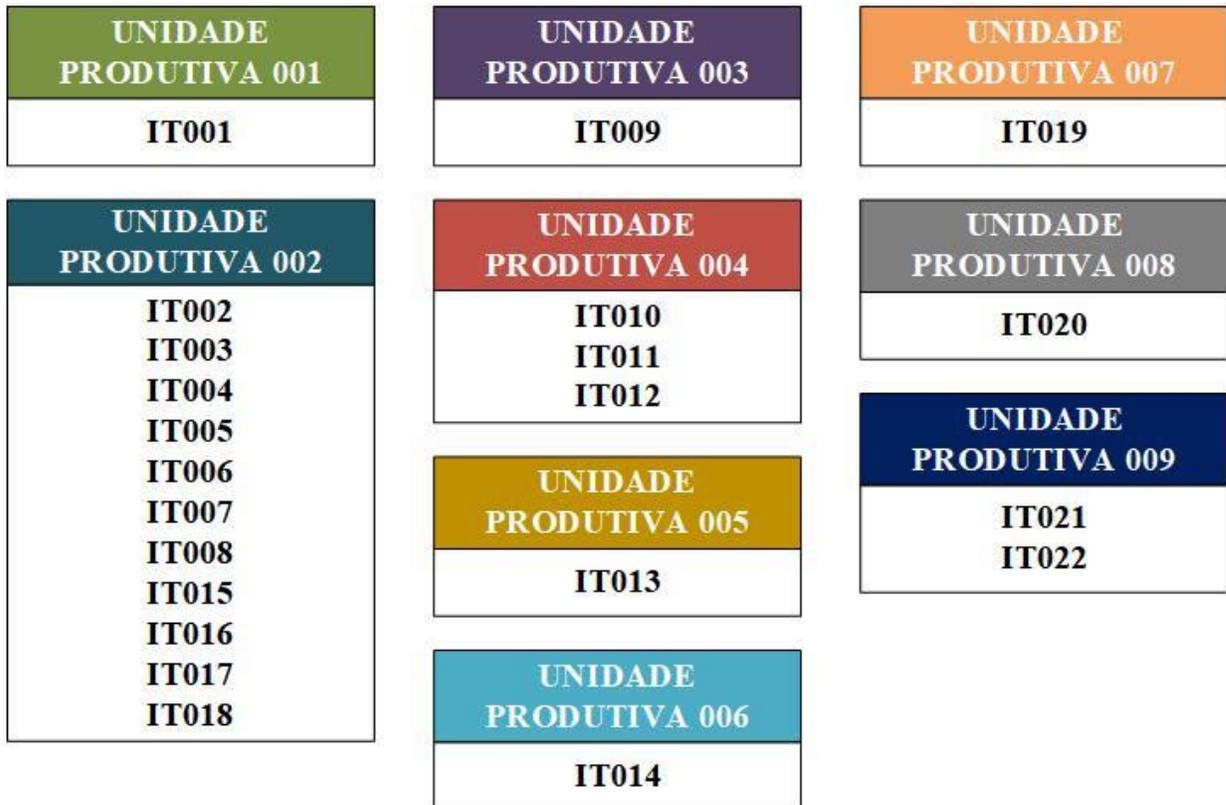
ITEM	DURAÇÃO (HORAS)	PERIODICIDADE (DIAS)	LIMITE MAN. OPORTUNA
IT001	4	394	217
IT002	4	365	201
IT003	4	365	201
IT004	4	365	201
IT005	4	440	242
IT006	4	365	201
IT007	4	427	235
IT008	4	365	201
IT009	2	400	220
IT010	4	177	98
IT011	4	132	73
IT012	4	365	201
IT013	4	365	201
IT014	4	440	242
IT015	4	365	201
IT016	4	400	220
IT017	4	365	201
IT018	4	365	201
IT019	4	365	201
IT020	6	365	201
IT021	6	365	201
IT022	6	365	201

Fonte: A autora (2021)

Os itens IT010, IT011 e IT012 quando apresentam uma parada em sua operação provocam a parada total da planta, enquanto os demais itens provocam apenas a parada da unidade produtiva em que estão inseridos. A relação entre eles e a unidade produtiva que sofre a parada durante a manutenção (ou falha) do item está representada na Figura 4. Conforme ilustrado na Figura 4, a planta da fábrica, denominada como sistema, possui diversas Unidades Produtivas (subsistemas) nas quais os itens críticos da produção estão inseridos. Os itens que pertencem a Unidade Produtiva

004 são os mais críticos, pois provocam a para total da planta, os demais componentes provocam apenas a parada do subsistema que estão inseridos.

Figura 4 - Relação entre os itens do sistema



Fonte: A autora (2021)

A Tabela 2 apresenta o cronograma das ações de manutenção programadas fornecido pelo *software* utilizado pela gerência, onde a data de cada manutenção programada respeita a periodicidade do item de acordo com os critérios fornecidos ao programa. O *software* utilizado não considera as oportunidades geradas pela manutenção programada de outros equipamentos, entretanto, a gerência informou que a partir dos sete meses, todos os itens estão sujeitos a manutenção oportuna.

Pelo cronograma inicial fornecido na Tabela 2, é possível observar que, ao longo da execução do plano, o processo produtivo está sujeito a sofrer um total de 21 paradas, sendo que quatro das

paradas programadas implicam na parada total da planta, e as demais na parada da Unidade produtiva que estão inseridas. E apenas em duas paradas programadas, mais de um item irá passar por uma ação de manutenção, nos dias 04/05/2021, os itens IT002 e IT006 pertencentes ao mesmo subsistema, e no dia 24/06/2021 os itens IT019 e IT022, pertencentes a subsistemas distintos.

Tabela 2 - Cronograma de manutenção programada para os itens críticos do processo

ITEM	DATA PROGRAMADA	ITEM	DATA PROGRAMADA
IT012	15/01/2021	IT018	17/06/2021
IT020	05/02/2021	IT015	21/06/2021
IT021	09/02/2021	IT019	24/06/2021
IT004	10/02/2021	IT022	24/06/2021
IT013	16/03/2021	IT011	01/07/2021
IT003	23/04/2021	IT005	22/07/2021
IT017	26/04/2021	IT016	27/07/2021
IT002	04/05/2021	IT014	15/09/2021
IT006	04/05/2021	IT007	27/09/2021
IT008	05/05/2021	IT011	10/11/2021
IT010	07/05/2021	IT009	13/11/2021
IT001	08/05/2021	-	-

Fonte: A autora (2021)

A proposta de implementar a dinâmica no cronograma das atividades programadas consiste em aproveitar o momento em que o sistema (ou subsistema) está parado (devido a ação de manutenção) para realizar a manutenção preventiva nos demais equipamentos que estão sujeitos a manutenção oportuna, e assim, reduzir os custos associados a improdutividade da planta. Além disso, também são consideradas as mudanças durante a execução do plano em decorrência das falhas nos equipamentos. Quando o equipamento falha e passa pela manutenção corretiva, a ação de manutenção preventiva programada para a próxima data deve respeitar a periodicidade definida entre as manutenções.

Para agregar a dinâmica no plano, o limite de manutenção oportuna para cada item crítico do processo, apresentado na Tabela 1, foi calculado com base nas regras definidas por Sarker e Faiz (2016), onde foi considerado apenas o limite inferior, que determina o momento em que o equipamento está sujeito a manutenção oportuna. Embora o gestor tenha informado que a partir do sétimo mês todos os itens estavam disponíveis a manutenção oportuna, a periodicidade de alguns dos itens não respeitava esse período de manutenção e optou-se por considerar a regra assumida no modelo proposto. Entretanto, para os itens que respeitavam o período de manutenção programada no intervalo de 12 meses, o limite de manutenção oportuna definido nesse trabalho ficou bem próximo do limite da oportuna fornecida pelo gestor.

Como dito anteriormente, as oportunidades consideradas no plano ocorrem quando o sistema para devido a ação de manutenção corretiva (quando um item apresenta uma falha) ou devido a ação de manutenção preventiva programada. A seguir são apresentadas algumas situações da dinâmica do plano de manutenção que visam a redução do número de paradas do sistema ao considerar as oportunidades

3.2.1 Agrupamento das atividades programadas de manutenção

Ao definir as regras de manutenção, a proposta inicial do modelo dinâmico é que o primeiro cronograma de manutenção fornecido pelo sistema leve em consideração as oportunidades que surgem devido as paradas programadas com o intuito de reduzir o tempo de inatividade do sistema, de modo que o plano inicial fornecido ao gestor resulte no modelo apresentado na Tabela 3.

De modo geral, o cronograma de manutenção inicial consiste no aproveitamento do período em que o sistema ou subsistema se encontra parado, devido a ação de manutenção programada em um item, para realizar a manutenção nos demais itens que estão sujeitos a manutenção oportuna e são diretamente influenciados pela parada provocada. A proposta consiste em realocar o máximo de atividades de manutenção possíveis para o mesmo período, respeitando o limite inferior n_i e superior N_i da manutenção oportuna definidos para cada equipamento. Ao agrupar as atividades, é desejável que o intervalo definido entre as datas de manutenção se encontre mais próximo do limite superior (N_i), de modo a estar mais próxima da periodicidade definida pelo gestor. Como

também, é considerada a duração de execução das atividades, uma vez que algumas atividades demandam um tempo maior para serem realizadas em comparação a outras.

Tabela 3 - Primeira atualização do cronograma de manutenção

ITEM	UNIDADE	TIPO DE PARADA	DATA PROGRAMADA	DATA LIM. OPORT.	DATA ATUALIZADA
IT012	4	PLANTA	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021
IT020	8	UNIDADE	05/02/2021	25/08/2020	15/01/2021
IT021	9	UNIDADE	09/02/2021	29/08/2020	15/01/2021
IT004	2	UNIDADE	10/02/2021	30/08/2020	15/01/2021
IT013	5	UNIDADE	16/03/2021	04/10/2020	15/01/2021
IT003	2	UNIDADE	23/04/2021	10/11/2020	23/04/2021
IT017	2	UNIDADE	26/04/2021	13/11/2020	23/04/2021
IT002	2	UNIDADE	04/05/2021	21/11/2020	23/04/2021
IT006	2	UNIDADE	04/05/2021	21/11/2020	23/04/2021
IT008	2	UNIDADE	05/05/2021	22/11/2020	23/04/2021
IT010	4	PLANTA	07/05/2021	17/02/2021	23/04/2021
IT001	1	UNIDADE	08/05/2021	12/11/2020	23/04/2021
IT011	4	PLANTA	01/07/2021	19/03/2021	23/04/2021
IT018	2	UNIDADE	17/06/2021	04/01/2021	17/06/2021
IT015	2	UNIDADE	21/06/2021	09/01/2021	17/06/2021
IT019	7	UNIDADE	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021
IT022	9	UNIDADE	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021
IT005	2	UNIDADE	22/07/2021	05/01/2021	22/07/2021
IT016	2	UNIDADE	27/07/2021	28/01/2021	22/07/2021
IT007	2	UNIDADE	27/09/2021	19/03/2021	22/07/2021
IT014	6	UNIDADE	15/09/2021	01/03/2021	22/07/2021
IT011	4	PLANTA	10/11/2021	06/11/2021	10/11/2021
IT009	3	UNIDADE	13/11/2021	17/05/2021	10/11/2021

Fonte: A autora (2021)

O agrupamento das atividades proposto seguiu dois princípios básicos adotados pela empresa, onde são disponibilizadas 42 horas para a realização de todas as ações de manutenção e, foi priorizado o agrupamento as atividades em itens que pertencem a mesma Unidade Produtiva, ou a itens que provocam a parada da planta. Conforme é possível observar na Tabela 3, com a atualização inicial do plano, ao realizar o agrupamento das atividades de manutenção, considerando o limite de oportunidade, o sistema teve uma redução de 71% do número de paradas programadas,

passando a apresentar apenas seis paradas programadas ao longo do ano. Sendo que três das paradas programadas implicam na parada total da planta, o que resultaria em uma redução de 25% do tempo de improdutividade total da planta.

Embora o item IT004 (pertencente a Unidade 02) tenha passado pela manutenção programada no dia 10/02/2021, e os itens IT003, IT017, IT002, IT006 e IT008 (pertencentes a mesma Unidade) estivessem sujeitos a manutenção programada nesta data, não seria possível realizar todas as atividades nesta data devido a restrição do tempo de disponibilidade para a realização da manutenção (42 horas). Como uma das propostas do modelo é manter a periodicidade da manutenção mais próxima da periodicidade definida no plano, as atividades de manutenção foram realocadas para a data da próxima oportunidade, neste caso seria o dia 23/04/2021.

3.2.2 Atualização do cronograma dinâmico de manutenção

Com o intuito de representar as demais oportunidades consideradas no modelo desenvolvido, foram feitas simulações de ocorrências de falhas nos itens críticos do processo. Supondo que o plano estabelecido na Tabela 3 esteja em execução, e todas as atividades programadas estão sendo executadas conforme o plano. Considerando $t = 0$ o início da execução do plano, no dia 01/01/2021. Na data 12/04/2021, $t = 101$, o item IT015 apresentou uma falha e a manutenção corretiva é executada, quando a idade do equipamento corresponde a $x_{15}(101) = 298$.

Em um plano estático, a programação das atividades iria se manter conforme a definição do plano inicial. Entretanto, é possível observar na Tabela 3 que, caso o plano fosse mantido, o mesmo item IT015 estaria passando por uma nova manutenção na data 17/06/2021, quanto sua idade correspondesse a $x_{15} = 66$, de forma que a periodicidade entre as manutenções do item não respeitaria a condição $201 \leq x_{15} \leq 364$, que define o momento em que o equipamento pode passar pela atividade de manutenção.

Desta forma, o plano de manutenção dinâmico iria realocar a manutenção do item IT015 seguinte a falha que estava programada para o dia 11/04/2022, reduzindo a quantidade de ações de manutenção preventivas desnecessárias no processo uma vez que o item já sofreu uma calibração. Na Tabela 4, é apresentado o novo cronograma disponibilizado ao gestor após inserir a informação

da ocorrência de falha do item IT015 no sistema. O modelo fornece essa atualização do plano, considerando os impactos causados no cronograma devido a ação da manutenção corretiva, como também as oportunidades do sistema em decorrência da(s) parada(s) do sistema ou subsistema.

Tabela 4 - Cronograma atualização após a primeira ocorrência de falha

ITEM	DATA PROGRAMADA	DATA LIM. OPORT.	DATA ATUALIZADA	DATA OCORRÊNCIA
IT012	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT020	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT021	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT004	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT013	15/01/2021	05/08/2020	15/01/2021	
IT015			12/04/2021	12/04/2021
IT003	23/04/2021	10/11/2020	12/04/2021	
IT017	23/04/2021	10/11/2020	12/04/2021	
IT002	23/04/2021	10/11/2020	12/04/2021	
IT006	23/04/2021	10/11/2020	12/04/2021	
IT008	23/04/2021	10/11/2020	12/04/2021	
IT010	23/04/2021	03/02/2021	23/04/2021	
IT001	23/04/2021	28/10/2020	23/04/2021	
IT011	23/04/2021	19/04/2021	23/04/2021	
IT018	17/06/2021	04/01/2021	17/06/2021	
IT019	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021	
IT022	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021	
IT005	22/07/2021	05/01/2021	22/07/2021	
IT016	22/07/2021	23/01/2021	22/07/2021	
IT007	22/07/2021	11/01/2021	22/07/2021	
IT014	22/07/2021	05/01/2021	22/07/2021	
IT011	10/11/2021	06/11/2021	10/11/2021	
IT009	10/11/2021	14/05/2021	10/11/2021	
IT015	23/04/2021	11/11/2020	11/04/2022	

Fonte: A autora (2021)

A proposta é que essa atualização do plano ocorra toda vez que uma nova informação for inserida ao modelo. Como o item IT015 sofreu uma manutenção corretiva no dia 12/04/2021, sendo este um item crítico para o subsistema denominado Unidade Produtiva 002, os itens presentes no sistema que estão sujeitos a manutenção oportuna nesta data são indicados ao gestor quando o

sistema fornece a atualização da data da manutenção programada para os itens IT003, IT017, IT002, IT006 e IT008, conforme apresentado na Tabela 4. Com a atualização do cronograma, o sistema conta com um total de sete paradas, representando uma redução de 67% no número de paradas programadas.

Supondo que o cronograma de manutenção apresentado na Tabela 4 estivesse em execução, e o item IT009 apresentou uma falha no dia 13/05/2021, $t = 132$, e a manutenção corretiva é executada quando a idade do componente corresponde a $x_{09}(132) = 275$. Ao fornecer ao sistema essa informação, o cronograma novamente seria atualizado, de forma que a data da próxima ação de manutenção do item IT009 fosse ajustada dentro da periodicidade definida no planejamento e, os itens que estivessem sujeitos a manutenção oportuna nessa data também seriam apresentados no cronograma para o gestor.

Conforme apresentado na Tabela 4, caso o cronograma fosse mantido, o item IT009 teria uma ação de manutenção programada para o dia 10/11/2021. Como o item já foi mantido corretivamente no dia 13/05/2021, na data 10/11/2021 a idade do item corresponderia a $x_{09} = 181$, de forma que a periodicidade entre as manutenções não respeitaria a condição $220 \leq x_{09} \leq 400$. Logo o cronograma iria atualizar a data de forma que o item estivesse sujeito a manutenção preventiva quando sua idade correspondesse a periodicidade definida no plano $x_{09} = 400$, sendo assim, o cronograma das atividades de manutenção é atualizado novamente e fornecido ao gestor conforme apresentado na Tabela 5.

É possível observar, após a atualização do cronograma, que a quantidade de paradas anuais das unidades produtoras corresponde a um total de oito paradas, considerando tanto as paradas programadas quanto as paradas não programadas. Em comparação com o cronograma inicial fornecido pelo *software* o número de paradas anuais sofreria uma redução de 62%, embora tenham ocorrido paradas não programadas devido a falha de componentes.

O IT009 pertence a Unidade Produtiva 003, onde é o único componente crítico do processo, sendo assim, não iria influenciar diretamente na parada dos demais componentes críticos, por este motivo a data da manutenção programada dos outros itens não são atualizadas. Uma vez que, a

oportunidade só surge quando o componente provoca a parada nos demais componentes do sistema, apenas os itens presentes na Unidade Produtiva 003 estariam sujeitos a oportuna.

Nessa aplicação do modelo proposto, com o intuito de simplificar a análise e o processamento das informações, a aplicação se limitou apenas aos itens críticos, não foram considerados os demais itens da unidade. Entretanto, a proposta é que o cronograma seja ajustado para todos os itens, e conforme apresentando nesse trabalho, os componentes na Unidade Produtiva 003 sujeitos a manutenção oportuna seriam apresentados ao gestor com suas respectivas datas de manutenção ajustadas, de acordo com o limite da manutenção oportuna pré-definida no plano.

Tabela 5 - Cronograma atualização após a segunda ocorrência de falha

ITEM	DATA PROGRAMADA	DATA LIM. OPORT.	DATA ATUALIZADA	DATA OCORRÊNCIA
IT012	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT020	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT021	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT004	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT013	15/01/2021	05/08/2020	15/01/2021	
IT015			12/04/2021	12/04/2021
IT003	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT017	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT002	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT006	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT008	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT010	23/04/2021	03/02/2021	23/04/2021	
IT001	23/04/2021	28/10/2020	23/04/2021	
IT011	23/04/2021	09/01/2021	23/04/2021	
IT009			13/05/2021	13/05/2021
IT018	17/06/2021	04/01/2021	17/06/2021	
IT019	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021	
IT022	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021	
IT005	22/07/2021	05/01/2021	22/07/2021	
IT016	22/07/2021	23/01/2021	22/07/2021	
IT007	22/07/2021	11/01/2021	22/07/2021	
IT014	22/07/2021	05/01/2021	15/09/2021	
IT011	10/11/2021	29/07/2021	15/09/2021	
IT015	11/04/2022	30/10/2021	11/04/2022	
IT009	10/11/2021	14/05/2021	17/06/2022	

Fonte: A autora (2021)

Por fim, a última simulação de ocorrência de falha nos componentes do sistema corresponde a uma falha no item IT010 no dia 28/08/2021, $t = 239$, quando a idade do item era $x_{10} = 127$. O item IT010 pertence a Unidade Produtiva 004, onde a parada dos itens críticos provoca a parada da planta, sendo assim, no dia 28/08/2021, quando o item IT010 apresentou uma falha e provocou a parada o sistema, todos os demais itens da fábrica podem estar sujeitos a manutenção oportuna.

Tabela 6 - Cronograma atualização após a terceira ocorrência de falha

ITEM	DATA PROGRAMADA	DATA LIM. OPORT.	DATA ATUALIZADA	DATA OCORRÊNCIA
IT012	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT020	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT021	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT004	15/01/2021	04/08/2020	15/01/2021	
IT013	15/01/2021	05/08/2020	15/01/2021	
IT015			12/04/2021	12/04/2021
IT003	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT017	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT002	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT006	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT008	12/04/2021	30/10/2020	12/04/2021	
IT010	23/04/2021	03/02/2021	23/04/2021	
IT001	23/04/2021	28/10/2020	23/04/2021	
IT011	23/04/2021	09/01/2021	23/04/2021	
IT009			13/05/2021	13/05/2021
IT018	17/06/2021	04/01/2021	17/06/2021	
IT019	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021	
IT022	24/06/2021	11/01/2021	24/06/2021	
IT005	22/07/2021	05/01/2021	22/07/2021	
IT016	22/07/2021	23/01/2021	22/07/2021	
IT007	22/07/2021	11/01/2021	22/07/2021	
IT010			28/08/2021	28/08/2021
IT014	15/09/2021	01/03/2021	28/08/2021	
IT011	15/09/2021	03/06/2021	28/08/2021	
IT015	17/06/2021	05/01/2021	11/04/2022	
IT009	17/06/2022	19/12/2021	17/06/2022	

Fonte: A autora (2021)

Ao receber a informação da falha do item IT010, o modelo verifica novamente quais componentes estão sujeitos a manutenção oportuna e fornece essa informação para o gestor ao atualizar o cronograma das atividades. Na Tabela 6, é apresentado o novo cronograma disponibilizado pelo modelo, onde é possível verificar que os itens IT014 e IT011 estavam sujeitos a manutenção oportuna, uma vez que a idade dos componentes respeitava os limites pré-estabelecidos no plano inicial no momento da parada, $242 \leq x_{14} \leq 440$ e $128 \leq x_{11} \leq 232$.

Com a atualização do cronograma, foi possível manter um total de oito paradas anuais, uma redução significativa em comparação ao cronograma inicial fornecido pelo decisor. Mesmo após três paradas não programadas nos itens críticos do sistema, foi possível reduzir em 62% o número total de paradas ao aproveitar as oportunidades geradas durante a execução do plano.

Em relação a parada total da planta, em decorrência das paradas dos itens IT010, IT011 e IT012, inicialmente, no plano fornecido pelo gestor estavam programadas quatro paradas. Após aplicar a metodologia proposta pelo modelo, foi possível uma redução de 25% do tempo de improdutividade total da planta, ao agrupar as atividades de manutenção com base nos limites de oportunidade dos componentes.

A operacionalização do método proposto foi desenvolvida com auxílio de planilhas do *Microsoft Excel*, onde foram considerados apenas os itens críticos da planta da fábrica ao propor o cronograma para facilitar a visualização dos resultados. Os dados relacionados aos tempos de paradas e dependências entre os itens foram respeitados conforme informações fornecidas pelo gestor, apenas a nomenclatura dos setores e itens foram alteradas pela melhor identificação. Entretanto, a periodicidade entre as atividades de manutenção foi considerada a última apresentada no plano definido pelo *software Isoplan 5.0*, sendo considerada como estática, uma vez que a manutenção no modelo proposto é assumida como perfeita.

Os resultados apresentados ao gestor foram bem satisfatórios, uma vez que ele informou que o *software* utilizado não considera a possibilidade de agrupar as atividades de manutenção, e que o cronograma é construído com base na periodicidade, embora o setor tenha como parâmetro um limite de oportunidade para a manutenção preventiva.

Vale ressaltar que devido as premissas apresentadas na metodologia, o modelo proposto ainda apresenta algumas limitações ao considerar situações reais. Desta forma, resultados apresentados foram bastante otimistas em relação ao cenário ideal. Entretanto, o gestor afirmou que uma redução anual de 5% do tempo de improdutividade da fábrica implicaria um ótimo ganho para a produção, uma vez que o setor enfrenta um constante problema no planejamento das atividades de manutenção devido ao número excessivo de paradas.

Sendo assim, de forma geral, a construção do modelo proposto foi satisfatória e atendeu às expectativas, possibilitando estruturar um cronograma das atividades de manutenção dinâmico, que considerasse as oportunidades geradas pelo sistema ao agrupar as atividades de manutenção e respondesse as informações de paradas durante sua execução.

3.3 EXTENSÕES DO MODELO

Para o desenvolvimento do modelo proposto, uma primeira versão foi apresentada na Subseção 3.1. Entretanto, em sistemas reais de produção, algumas das premissas assumidas no modelo não são atendidas. Nessa seção serão discutidas algumas possíveis extensões do modelo ao agregar mecanismos que irão eliminar as simplificações assumidas nas premissas 3 e 5 do modelo.

Em que, na premissa 3, as atividades de manutenção são consideradas idênticas e perfeitas, ou seja, ao realizar uma ação de manutenção, o equipamento volta ao seu estado de “tão bom quanto novo”. E na premissa 5, a limitação dos recursos disponíveis não é considerada, ou seja, todos os recursos para prática de manutenção estão disponíveis a qualquer momento. Essas extensões do modelo proposto serão discutidas e apresentadas nos seguintes itens.

3.3.1 Manutenção imperfeita

No desenvolvimento do modelo proposto, foi adotada como premissa que as ações de manutenção são consideradas idênticas e perfeitas, ou seja, ao passar por qualquer uma das ações de manutenção o equipamento volta a condição de tão bom quanto novo, conforme apresentado abaixo:

“Premissa 3: As ações de manutenção no modelo são consideradas idênticas e perfeitas, onde o equipamento retorna à condição de “tão bom quanto novo” ao passar por uma intervenção

de manutenção. O tempo que as ações de manutenção levam para serem realizadas são desprezados no modelo.”

Em situações reais, após passar por uma ação de manutenção um componente não volta para o mesmo estado que se encontrava no início de seu uso, isso significa que o componente sofre uma deterioração toda vez que passa por uma manutenção. No modelo apresentado por Sarker e Faiz (2016), a estratégia de manutenção preventiva oportunista ocorre em vários níveis, onde para cada um deles são atribuídos limites máximos e mínimos (como uma porcentagem da idade de falha considerada na primeira versão do modelo).

Para cada um desses níveis da manutenção oportuna, também são definidas as porcentagens de redução da idade, uma vez que no modelo proposto pelos autores, ao depender do momento em que o equipamento passa por ação de manutenção, ele sofre um determinado nível de depreciação, ou seja, não volta ao estado de tão bom quanto novo, visto que a manutenção é imperfeita.

Ao atingir o limite máximo de idade, os equipamentos são substituídos preventivamente para evitar falhas, retornando à condição de novo (idade x_0). E assim como no modelo proposto, um limite mínimo é atribuído, e uma vez que a idade do equipamento se encontra abaixo desse limite, ele é deixado como está, sem nenhuma ação de manutenção.

Ao considerar a manutenção oportuna imperfeita e o grau de depreciação do equipamento, deve-se adotar um limite máximo da manutenção oportuna, que foi considerado 95% da idade de substituição (tempo atribuído para a manutenção preventiva). Isso porque ao atingir a idade máxima N_i , o equipamento passa pela manutenção preventiva, que corresponde a substituição preventiva, não estando mais sujeito a manutenção oportuna. Sendo assim, o limite máximo que o equipamento i pode passar pela manutenção oportuna, representado por m_i corresponde à 95% da idade de substituição (N_i).

Seguindo a proposta de Sarker e Faiz (2016), todo o intervalo entre os limiares de idade máximo e mínimo dos componentes é dividido em seis grupos, de modo que existe um total de sete limiares de idade, incluindo os dois extremos. Os equipamentos com idades entre os dois limiares extremos são submetidos a vários graus de ações preventivas de manutenção sem substituição. Desta forma, considerando n_i e m_i os limites de idade mínimo e máximo, respectivamente, em

qualquer equipamento i , o equipamento estaria sujeito a manutenção preventiva imperfeita de grau d se a sua idade x_i no momento t satisfizer a seguinte condição:

$$n_i \leq x_i(t) < m_i \quad (1)$$

Desta forma, o limite máximo de idade representa a idade da manutenção preventiva atribuída no plano de manutenção, ao atingir esse limite o componente é submetido à substituição preventiva. Entre o limite de idade máxima em 95% e o limite mínimo em 55%, são atribuídos mais três limites de idade. Na Tabela 7 são apresentados todos os limiares de idade para o sistema considerando seis grupos de idade. Os graus de redução de idade associados a cada grupo devido à ação da manutenção também são apresentados na tabela.

Tabela 7 - Grupos de idade e porcentagem de redução de idade

Grupo	Idade (Percentual da idade de falha)	Percentual de redução de idade
1	> 95	Substituição
2	$85 < x \leq 95$	50
3	$75 < x \leq 85$	38,5
4	$65 < x \leq 75$	26,7
5	$55 < x \leq 65$	15
6	≤ 55	Não passa por manutenção

Fonte: Sarker e Faiz (2016) Modificado pelo autor (2021)

Ao agregar essa extensão no modelo proposto, a simplificação adotada na premissa três é eliminada, e a premissa pode ser alterada para a seguinte:

Premissa: A idade de um item retorna à condição de novo quando sofre uma ação de manutenção corretiva ou preventiva, em sua idade maior ou igual a 95% do tempo máximo de substituição. Ao passar por uma prática de manutenção oportuna o percentual de redução de idade do item depende do grupo etário em que a unidade se encontra.

3.1.1 Recursos limitados

No desenvolvimento do modelo, também foi desconsiderada a disponibilidade dos recursos para as práticas de manutenção ao adotar a seguinte premissa:

“Premissa 5: Todos os recursos necessários para atividades de manutenção estão disponíveis.”

Entretanto, em situações reais, os recursos necessários, como peças de reposição, para a execução das práticas de manutenção são limitados, sendo possível apenas a realização de um número limitado das ações de manutenção. Tal fato, implica que as ações de manutenção corretivas, preventivas e oportunas devem ser priorizadas uma vez que os recursos disponíveis são limitados. No modelo proposto por Zhang e Zeng (2017), as atividades de manutenção e os pedidos de peças de reposição são determinados de acordo com os requisitos de manutenção e o estado do estoque de peças de reposição. No presente trabalho, é adotada como análise apenas a priorização das atividades de manutenção de acordo com a disponibilidade do estoque disponível.

Devido as restrições de peças de reposição disponíveis no inventário, nem todos os requisitos de manutenção podem ser atendidos ao mesmo tempo. Após o gestor fornecer novas informações ao modelo, identificar as oportunidades existentes, os requisitos de manutenção são determinados de acordo com a quantidade de recursos disponíveis em estoque e a priorização das atividades de manutenção.

Seguindo o modelo proposto por Zhang e Zeng (2017), as prioridades das atividades de manutenção são definidas de acordo com o grau de deterioração para os três tipos de manutenção, desta forma, a realização da manutenção corretiva tem maior prioridade, seguida da manutenção preventiva e da manutenção oportuna. Supondo que C_t representa a quantidade de unidades que precisam de manutenção corretiva, P_t a quantidade de unidades que precisam da manutenção preventiva e O_t a quantidade de unidades sujeitas a manutenção oportuna no tempo t em um sistema com M unidades, sabe-se que $0 \leq C_t + P_t + O_t \leq M$.

Presume-se que apenas uma peça sobressalente seja consumida para cada atividade de manutenção referente a cada unidade. A quantidade de peças de reposição disponíveis em estoque no momento t é representada por U_t . Devido as restrições de disponibilidade, nem todas as atividades de manutenção C_t , P_t e O_t podem ser executadas ao mesmo tempo. No entanto, com o intuito de garantir a disponibilidade do sistema, as ações de manutenção são realizadas o mais

rápido possível seguindo os critérios de priorização e a disponibilidade de peças de reposição, sendo assim, os possíveis cenários são:

i. Se $0 \leq U_t < C_t$, apenas os U_t itens podem ser mantidos corretivamente, os restantes que precisam de manutenção corretiva serão desligados, e os equipamentos sujeitos a preventiva e oportuna continuarão operando. Cada atividade de manutenção atrasada é realizada imediatamente após a reposição dos recursos;

ii. Se $C_t \leq U_t < C_t + P_t$, todas as unidades que precisam de manutenção corretiva e as $U_t - C_t$ unidades que precisam de manutenção preventiva são mantidas. Os demais equipamentos que estão sujeitos a manutenção oportuna continuarão operando até que os recursos estejam disponíveis.

iii. Se $C_t + P_t \leq U_t < C_t + P_t + O_t$, todas as C_t unidades sujeitas a manutenção corretiva, as P_t unidades sujeitas a manutenção preventiva são mantidas, e as $U_t - C_t - P_t$ unidades serão sujeitas a manutenção oportuna. As demais unidades $O_t - (U_t - C_t - P_t)$, sujeitas a manutenção oportuna continuarão operando até que os recursos estejam disponíveis, priorizando as unidades que possuem a idade mais próxima da idade de falha, ou seja, o valor mínimo de $x_i(t) - N_i$.

iv. Se $C_t + P_t + O_t \leq U_t$, todos os requisitos de manutenção podem ser atendidos simultaneamente.

Nessa extensão, a simplificação assumida na premissa cinco é eliminada, podendo ser substituída por duas novas premissas, sendo estas:

a) **Premissa:** Apenas uma peça de sobressalente é consumida para cada atividade de manutenção referente a cada equipamento.

b) **Premissa:** As atividades de manutenção são priorizadas de acordo com o grau de deterioração, de forma que a manutenção corretiva tem maior prioridade, em seguida a preventiva e da manutenção oportuna de menor prioridade. Sendo que as atividades preventivas e oportunas são priorizadas de acordo com a idade, onde as unidades que possuem a idade mais próxima do tempo de falha são priorizadas.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de sua aplicação foi possível observar que o modelo se apresenta bem útil ao propor a análise de redução do número de paradas para o sistema. A quantidade de paradas na produção devido a ação da manutenção foi um fator crítico apresentado pela empresa, e gestor informou que uma pequena redução de 5% do número de paradas já representaria um ganho econômico significativo para a fábrica ao reduzir os custos associados a alocação da equipe de manutenção.

Atualmente, a gerência não possui suporte para avaliar o agrupamento das atividades de manutenção, como também, avaliar o ganho econômico ao adotar a prática da manutenção oportuna. Sendo assim, seria necessário realizar uma análise mais profunda para avaliar o impacto econômico ao reduzir o número de paradas e aumento o tempo de parada das unidades.

As extensões do modelo propostas nesse capítulo podem ser agregadas ao modelo inicial a fim de enriquecer a proposta de resolução do problema, ao integrar as atividades de manutenção com outros aspectos da organização e se aproximar cada mais de uma situação ideal dentro das empresas. Como considerar a disponibilidades dos recursos e a depreciação dos equipamentos ao analisar as oportunidades e o agrupamento das atividades de manutenção.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesse capítulo são apresentadas as principais conclusões que resultam do estudo desenvolvido, assim como são propostas algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

4.1 CONCLUSÕES

Devido ao grande impacto das melhorias no gerenciamento da manutenção no orçamento do setor industrial, o interesse em metodologias de gerenciamento das atividades de manutenção tem aumentado constantemente. Nesse contexto, maior desafio dos gestores é planejar e gerenciar os recursos disponíveis da melhor maneira possível, garantindo uma gestão eficiente e eficaz que esteja integrada à estratégia corporativa.

O presente trabalho propôs a construção de um modelo de apoio a decisão no gerenciamento das atividades de manutenção agregando a dinâmica no cronograma das atividades de manutenção, sendo capaz de proporcionar a redução da improdutividade do sistema, resultante das paradas programadas, e reduzir o número de manutenções preventivas desnecessárias. Para construção do modelo proposto foi utilizado como referência o modelo apresentado por Sarker e Faiz (2016), com o objetivo de utilizar como parâmetro na avaliação dos possíveis cenários da manutenção oportuna disponíveis na construção do cronograma dinâmico, visando o fornecimento de uma recomendação mais adequada aos objetivos propostos.

O trabalho apresentou uma aplicação do modelo proposto em uma indústria de cloro e derivados, onde o cronograma das atividades de manutenção era gerado por meio do *software Isoplan 5.0*, e a periodicidade das atividades era definida com base na condição dos itens na data da última calibração. Entretanto, a fim de simplificação foi utilizado como periodicidade a última definida no cronograma fornecido pelo gestor.

As informações referentes ao plano de manutenção da fábrica foram fornecidas pelo gestor do setor de manutenção, podendo assim explicar as características e necessidades da empresa. Em conversa com o gestor, foi decidido que análise do problema iria se limitar apenas aos itens críticos do processo, devido ao grande volume de componentes presentes na planta fábrica, o que iria resultar na dificuldade no processamento das informações, uma vez que a parada nos demais itens

não iria gerar uma oportunidade no sistema, apenas seriam impactos pelas paradas da unidade produtiva (ou da planta) em virtude da parada de um ou mais item crítico.

A partir da definição das características do sistema e da disponibilidade do cronograma de manutenção inicial fornecido pelo *software Isoplan 5.0*, foi possível o estabelecimento da metodologia proposta nesse trabalho. A aplicação do modelo proposto possibilitou analisar as oportunidades geradas em dois níveis, sendo estes em nível de unidade produtiva e em nível de planta da fábrica, mostrando-se vantajoso ao possibilitar a redução do número de paradas programadas ao analisar o agrupamento das atividades de manutenção.

Os resultados revelaram, após a reprogramação das atividades com base nas oportunidades, que é possível reduzir significativamente o tempo improdutivo do sistema ao agrupar as atividades de manutenção programadas. No cronograma inicial, foi possível identificar uma redução de 71% das paradas programadas ao agregar o método proposto no cronograma fornecido pelo *software*, e uma redução de 25% do tempo de improdutividade total da planta. Por meio de simulações, também foi possível demonstrar as oportunidades que são geradas quando um dos itens apresenta uma parada devido a uma falha, onde por meio do ajuste no cronograma foi possível antecipar a data das calibrações dos itens que estavam sujeitos a manutenção oportuna.

Os resultados apresentados com a aplicação do modelo foram bem satisfatórios, uma vez que o *software* utilizado pelo setor não considera a possibilidade de agrupar as atividades de manutenção. Devido as premissas assumidas, o modelo proposto ainda apresenta algumas limitações ao considerar situações reais, o que fez os resultados serem bastante otimistas em relação ao cenário atual. De forma resumida, o modelo proposto alcançou seus objetivos, se demonstrando uma boa ferramenta para apoiar os gestores em decisões estratégicas, ao fornecer um método dinâmico de programação do cronograma das atividades, resultando em um impacto econômico devido a redução do tempo de improdutividade do sistema e atividades de manutenção preventivas em excesso.

4.2 TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento do modelo algumas limitações foram apresentadas ao atribuir suas premissas. Para a elaboração de trabalhos futuros relacionadas a implementação de um cronograma

dinâmico em um sistema de gestão, propõem-se então contornar essas limitações, de modo que o modelo se aproxime mais de uma situação real. Sendo assim, as sugestões estão descritas a seguir:

- Considerar que as atividades de manutenção são imperfeitas, onde a depender do momento em que o componente passa por uma ação, ele sofre um determinado nível de depreciação;
- Considerar tempos de preparação e execução das atividades de manutenção;
- Considerar que as atividades de manutenção podem ser atrasadas, ao definir um limite superior na periodicidade;
- Considerar a disponibilidade dos recursos necessários para a execução das atividades de manutenção;
- Realizar uma avaliação e incorporar no modelo a análise do *trade off* entre redução do número de paradas e aumento do tempo da parada do processo.
- Considerar o arranjo físico da planta e o deslocamento ao agrupar as atividades de manutenção.

REFERÊNCIAS

- BEN-DAYA, M. et al. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer-Verlag London, 2009.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 70, n. 1, p. 71-83, 2000.
- BOUVARD, K. *et al.* Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. Application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 96, n. 6, p. 601-610, 2011.
- CAVALCANTE, C. LOPES, R. Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. *Energy*, v. 80, p. 32-40, 2015.
- CAVALCANTE, C.A.V.; LOPES, R.S.; SCARF, P.A. A general inspection and opportunistic replacement policy for one-component systems of variable quality. *European Journal of Operational Research*, v. 266, n.3, p. 911-919, 2018.
- DAFFUA, S.O.; RAOUF, A. Planning and Control of Maintenance Systems: Modelling and Analysis. 2 ed. Springer International Publishing, 2015.
- DE ALMEIDA, A.T. *et al.* Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. Springer International Publishing, 2015.
- DHATRAK, O.; VEMURI, V.; GAO, L. Considering Deterioration Propagation in Transportation Infrastructure Maintenance Planning. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 7, n. 4, p. 520-528, 2020.
- DING, S.H.; KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization – literature review and directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 76, p. 1263-1283, 2015.
- FERNÁNDEZ, J. F.; MÁRQUEZ, A. C. Framework for implementation of maintenance management in distribution network service providers. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 94, n. 10, p. 1639-1649, 2009.
- FERNADEZ, O. *et al.* A decision support maintenance management system: development and implementation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 20, n. 8, p. 965 – 979, 2003.
- GUO, C. *et al.* A multi-event combination maintenance model based on event correlation. *Plos One*, v.13, n. 11, 2018.

- HORENBEEK, A. V.; PINTELON, L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 120, p. 39-50, 2013.
- JONGE, B.; SCARF, P. A. A review on maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, v. 285, n. 3, p. 805-824, 2020.
- KARDEC, A; NASCIF, J. Manutenção: função estratégica. 3 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- LINNÉUSSON, G. *et al.* A hybrid simulation-based optimization framework supporting strategic maintenance development to improve production performance. *European Journal of Operational Research*, v. 281, n. 2, p. 402-414, 2020.
- LIU, G. *et al.* Optimum opportunistic maintenance schedule incorporating delay time theory with imperfect maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 213, 2021.
- LIU, Y. *et al.* Dynamic maintenance plan optimization of fixture components for a multistation autobody assembly process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 85, p. 2703-2714, 2016.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- MÁRQUEZ, A. C. The Maintenance Management Framework: models and methods for complex systems maintenance. Seville: Springer, 2007.
- MÁRQUEZ, A. C. *et al.* The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 15, n. 2, p. 167-178, 2009.
- MIGUEL, P. A. *et al.* Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- MISHRA, R. P.; ANAND, G.; KODALI, R. Development of a framework for world-class maintenance systems. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, v. 5, n. 2, p. 141-165, 2006.
- NICOLAI, R.; DEKKER, R. Optimal Maintenance of Multi-component Systems: a review. In: *Complex System Handbook*, Springer Series in Reliability Engineering. Springer, London, 2008.
- PALMER, R. D. Maintenance Planning and Scheduling Handbook. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

- PHAN, D.; ZHU, Y. Multi-stage optimization for periodic inspection planning of geo-distributed infrastructure systems. *European Journal of Operational Research*, v. 245, n. 3, p. 797 – 804, 2015.
- PINJELA, S.K.; PINTELONA, 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.
- RIBEIRO, G.R.; COSTA, A.P.C. Um modelo dinâmico para o cronograma das atividades de manutenção. In: LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. João Pessoa, 2021.
- RUSCHEL, E.; SANTOS, E.; LOURES, E. Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 45, p. 180 – 194, 2017.
- SALAH, M.; OSMAN, H.; HOSNY, O. Performance-Based Reliability-Centered Maintenance Planning for Hospital Facilities. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 32, n. 1, 2018.
- SAMHOURI, M. S. An Intelligent Opportunistic Maintenance (OM) System: A Genetic Algorithm Approach. In: IEEE TORONTO INTERNATIONAL CONFERENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR HUMANITY, Toronto, p. 60-65, 2009.
- SARKER, B. R.; FAIZ, I. T. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy. *Renewable Energy*, v. 85, p. 104-113, 2016.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. Administração da Produção. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- UYSAL, F.; TOSUN, O. Fuzzy TOPSIS-based computerized maintenance management system selection. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 23, n. 2, p. 212 – 228, 2012.
- VAN, P. *et al.* Dynamic grouping maintenance with time limited opportunities. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 120, p. 51 – 59, 2013.
- VERBERT, K.; DE SCHUTTER, B.; BABUSKA, R. Timely condition-based maintenance planning for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v.159, p. 310-321, 2017.
- VIANA, H. Planejamento e controle de manutenção. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.
- VU, H. *et al.* Dynamic opportunist maintenance planning for multi-component redundant systems with various types of opportunities. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 198, 2020.

- XENOS, H. Gerenciando a manutenção produtiva. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.
- XIA, T. *et al.* Dynamic maintenance decision-making for series-parallel manufacturing system based on MAM-MTW methodology. *European Journal of Operational Research*, v. 221, n. 1, p. 231-240, 2012.
- ZHANG, X.; ZENG, J. A general modeling method for opportunistic maintenance modeling of multi-unit systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v.140, p. 176-190, 2015.
- ZHANG, X.; ZENG, J. Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems. *European Journal of Operational Research*, v. 262, n. 2, p. 479-498, 2017.
- ZHANG, C. *et al.* Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance. *Renewable Energy*, v. 103, p. 606-612, 2017.
- ZHANG, C.; YANG, T. Optimal maintenance planning and resource allocation for wind farms based on non-dominated sorting genetic algorithm-II. *Renewable Energy*, v.164, p. 1540-1549, 2021.
- ZHAO, X. *et al.* Integrated scheduling of distributed service resources for complex equipment considering multiple on-site MRO tasks. *International Journal of Production Research*, p. 1 – 19, 2021.
- ZHU, Z.; XIANG, Y.; ZENG, B. Multicomponent maintenance optimization: a stochastic programming approach. *Inform Journal on Computing*, v. 33, n. 3, p. 898 – 914, 2021.
- WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. A framework of maintenance concept development. *International Journal of Production Economics*, v. 77, n. 3, p. 299-313, 2002.
- WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. Maintenance concept development: A case study. *International Journal of Production Economics*, v. 89, n. 3, p. 395-405, 2004.
- WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, v. 139, n. 3, p. 469-489, 2002.
- YANG, C.; REMENYTE-PRESCOTT, R.; ANDREWS, J. Road maintenance planning using network flow modelling. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 28, n. 3, p. 387-402, 2017.