



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAFAELLA MARIA ARAGÃO PEREIRA

DETERMINAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO OPORTUNA PARA  
VÁLVULAS *MANIFOLD*

Recife

2020

RAFAELLA MARIA ARAGÃO PEREIRA

DETERMINAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO OPORTUNA PARA  
VÁLVULAS *MANIFOLD*

Trabalho de conclusão do curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Ramalho Alberti.

Recife

2020

Catalogação na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

P436d      Pereira, Rafaella Maria Aragão  
              Determinação de uma política de manutenção oportuna para válvulas  
*Manifold* / Rafaella Maria Aragão Pereira - 2020.  
              67 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Ramalho Alberti.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Departamento de Engenharia de Produção, 2020.  
Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Válvulas *Manifold*. 3. Manutenção oportuna. 4. Manutenção em bloco. 5. PSO. I. Alberti, Alexandre Ramalho (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-277

RAFAELLA MARIA ARAGÃO PEREIRA

DETERMINAÇÃO DE UMA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO OPORTUNA PARA  
VÁLVULAS *MANIFOLD*

Trabalho de conclusão do curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenharia de Produção.

Aprovada em: 17/11/2020

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alexandre Ramalho Alberti (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Cristiano Cavalcante (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Paula Cabral Seixas Costa (Examinadora Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, meus irmãos, minha cunhada e minha sobrinha que me acompanharam e me apoiaram ao longo do curso. Entretanto, gostaria de dedicar um trecho em especial ao meu pai, Rui Pereira, a quem devo o meu amor à exatas e a minha resiliência.

Agradeço também a todos os meus amigos por sempre estarem presentes para me ouvir e me manter motivada. Um agradecimento especial às minhas amigas de infância, Karina, Manuela, Bianca, Gabriela, Anne e Tayná, que sempre foram as minhas maiores incentivadoras. A Matheus por me mostrar a importância de manter o equilíbrio entre as diversas áreas da vida. E obviamente, não poderia deixar de mencionar uma das minhas melhores amigas, Juliana, com quem sempre posso contar tanto nos momentos bons quanto nos ruins.

Aos meus amigos engenheiros, os meus mais sinceros agradecimentos. Alesson e Mateus, obrigada por todo o apoio no meu momento mais difícil do curso. Leonardo, Laís, Damaris e Erika, e tantos outros, obrigada por tornar a minha vida acadêmica mais leve. Júlia e Rodolfo, não tenho nem palavras para agradecer todo o suporte dado por vocês, especialmente nessa reta final, parafraseando Júlia, irei levar vocês no meu coração. Allerson, João e Maicon, obrigada por serem profissionais incríveis e me inspirarem todos os dias. Marçal e Gustavo, vocês são meus grandes mentores, obrigada por me ensinarem o que realmente significa ser engenheira.

Por fim, agradeço ao meu orientador Alexandre por todo o acompanhamento neste trabalho de conclusão de curso e ao Departamento de Engenharia de Produção, e todos os seus colaboradores, por proporcionarem uma excelente graduação.

## RESUMO

O avanço tecnológico dos sistemas de produção tem tornado a função manutenção um diferencial para as organizações que estão sempre em busca de competitividade, redução de custos e melhoria da qualidade dos serviços ofertados. No que tange às indústrias alimentícias, há uma grande atenção à segurança dos alimentos, o que implica na utilização de componentes higiênicos, como as válvulas *Manifold*. Essas válvulas formam um sistema complexo que realiza um controle apurado do fluxo de fluidos e atende aos requisitos de segurança e de qualidade de maneira eficiente. Se não há um plano de manutenção bem desenhado para esse conjunto de válvulas, o sistema produtivo fica sujeito às falhas. O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo para apoio a determinação de uma política de manutenção oportuna para válvulas *Manifold*, e o seu desenvolvimento foi motivado por um estudo de caso sobre essas válvulas que são utilizadas em um sistema de envio de massa *wafer* líquida de uma indústria alimentícia. Para tal, é proposto uma política baseada no tempo que associa a manutenção oportuna com a manutenção em bloco. Um modelo que englobe os mecanismos de deterioração e falha do sistema estudado é desenvolvido para estimar o desempenho da política proposta. Com a aplicação do modelo é possível obter o custo de manutenção esperado por unidade de tempo, bem como, buscar boas combinações para as variáveis de decisão dessa política. Primeiramente, são apresentados os resultados obtidos através de uma simulação de Monte Carlo. Depois, são apresentadas boas soluções para as variáveis de decisão por meio da aplicação de um algoritmo de enxame de partículas (*PSO*, do inglês, *Particle Swarm Optimization*). Um estudo comparativo dessas soluções obtidas para o caso proposto é feito considerando casos particulares de manutenção em bloco, bem como, uma análise de sensibilidade dos resultados é realizada. Este trabalho, portanto, proporciona uma contribuição às aplicações existentes na literatura para sistemas complexos na área de manutenção e demonstra a viabilidade da adoção de uma política mais robusta em detrimento do uso exclusivo de uma política mais simples como a manutenção em bloco.

Palavras-chave: Válvulas *Manifold*. Manutenção oportuna. Manutenção em bloco. *PSO*.

## **ABSTRACT**

The technological advancement of production systems has made the maintenance function more relevant for organizations that are always looking for competitiveness, cost reduction and quality improvement of their offered services. Food industries pay great attention to food safety, which implies the use of hygienic components, such as Manifold valves. These valves form a complex system that accurately controls the flow of fluids and meets safety and quality requirements efficiently. If there is no well-designed maintenance plan for this set of valves, the production system is subject to failure. The objective of this work is to present a model to support the determination of an opportunistic maintenance policy for Manifold valves and its development was motivated by a case study about these valves that are used in a wafer mass shipping system of a food industry. To this end, a time-based policy is proposed that associates opportunistic maintenance with block maintenance. A model that includes the mechanisms of deterioration and failure of the studied system is developed to estimate the performance of the proposed policy. From the application of the model it is possible to obtain the expected maintenance cost per unit of time, as well as to seek good combinations for the decision variables of this policy. First, the results obtained through a Monte Carlo simulation are presented. Then, good solutions for the decision variables are presented through the application of a PSO (Particle Swarm Algorithm). A comparative study of these solutions obtained for the proposed case is made considering particular cases of block maintenance, furthermore a sensitivity analysis of the results is performed. This work, therefore, provides a contribution to the existing applications in the literature for complex systems in the maintenance area and demonstrates the feasibility of adopting a more robust policy at the expense of the exclusive use of a simpler policy such as block maintenance.

**Keywords:** Manifold valves. Opportunistic maintenance. Block maintenance. PSO.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de curva da banheira .....	20
Figura 2 – Relação entre medidas de confiabilidade .....	21
Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema complexo .....	23
Figura 4 – Processo de modelagem .....	25
Figura 5 – Fluxograma do PSO .....	27
Figura 6 – Representação de um sistema de produção e envio de massa wafer.....	37
Figura 7 – Válvulas <i>Manifold</i> .....	37
Figura 8 – Válvula de duplo assento .....	38
Figura 9 – Selo do meio do eixo da válvula inferior desmontado .....	39
Figura 10 – Estrutura proposta para o modelo de manutenção .....	41
Figura 11 – Sistema de válvulas Manifold .....	45
Figura 12 – Subsistema 1 .....	45
Figura 13 – Subsistema 2 .....	46
Figura 14 – Subsistema 3 .....	46
Figura 15 – Subsistema 4 .....	47
Figura 16 – Subsistema 5 .....	47
Figura 17– Simulação para determinação do custo da política de manutenção .....	49
Figura 18 – Topologia das partículas do PSO .....	54
Figura 19– Menor <b>CE</b> para o Caso 1 .....	57
Figura 20– Menor <b>CE</b> para o Caso 2 .....	57



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Notação utilizada no desenvolvimento do trabalho .....	42
Tabela 2 – Parâmetros da distribuição de probabilidade de falha mecânica .....	52
Tabela 3 – Solução Inicial .....	53
Tabela 4 – Valores de $CE$ para $nf$ distintos .....	53
Tabela 5– Aplicação do PSO.....	55
Tabela 6 – Comparação entre os casos .....	56
Tabela 7 – Análise de sensibilidade .....	58

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	12
1.2	OBJETIVOS .....	13
1.3	METODOLOGIA.....	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1	MANUTENÇÃO.....	16
2.1.1	Políticas de manutenção.....	16
2.1.2	Conceitos básicos de confiabilidade .....	18
2.1.3	Análise de sistemas complexos .....	22
2.2	MODELO .....	24
2.2.1	Modelagem matemática e otimização da manutenção.....	24
2.2.2	Monte Carlo e PSO (Particle Swarm Optimization).....	26
2.2.3	Manutenção em bloco e Manutenção oportuna.....	28
2.3	RESUMO DO CAPÍTULO .....	29
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>30</b>
3.1	POTENCIAL DE INOVAÇÃO .....	32
3.2	RESUMO DO CAPÍTULO .....	33
<b>4</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO -MOTIVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO..</b>	<b>34</b>
4.1	CONTEXTO DO PROBLEMA .....	34
4.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	35
4.2.1	Aspectos operacionais .....	35
4.2.2	Aspectos de falha .....	37
4.2.3	Manutenção.....	39
4.3	MODELO PROPOSTO.....	40
4.3.1	Estrutura da política de manutenção .....	40
4.3.2	Notação comum .....	42
4.3.3	Pressupostos do modelo .....	43
4.3.4	Desenvolvimento do modelo .....	44
4.3.5	Método de solução .....	49
4.4	APLICAÇÃO NUMÉRICA .....	51
4.4.1	Especificação dos valores dos parâmetros do modelo.....	52

4.4.2	Aplicação do <i>PSO</i> .....	53
4.4.3	Comparação com outras políticas de manutenção e análise de sensibilidade .....	56
5	CONCLUSÃO.....	60
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	60
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
	REFERÊNCIAS .....	62

## 1 INTRODUÇÃO

As empresas têm como principal objetivo otimizar a remuneração do capital investido por meio de novas metodologias que aumentem a eficiência e eficácia do seu sistema produtivo, bem como que mantenha a função produção em níveis competitivos. Alvo de grandes mudanças, por meio do avanço tecnológico das máquinas e equipamentos, a função manutenção tem se tornado um diferencial para que as empresas atinjam esse objetivo (FERREIRA, CAVALCANTE & DE ALMEIDA, 2003). As ações da engenharia de manutenção são diferentes em cada planta, sendo influenciadas pelo tamanho, tipo, política da companhia, além de diversos outros fatores (CAVALCANTE, 2018; BOGGS, 1997). Entretanto, podem-se destacar como objetivos principais e comuns nos vários setores em que a manutenção é empregada: estender a vida útil de ativos, assegurar níveis de disponibilidade satisfatórios, assegurar prontidão operacional para todos os equipamentos requeridos para o uso em emergências a qualquer tempo e prover a segurança das pessoas que fazem uso das instalações (CAVALCANTE, 2018; LEVITT, 2003; CORDER, 1976; NEWBROUGH, 1967).

Entre as estratégias de manutenção, destacam-se: manutenção corretiva, de caráter reativo, que consiste em todas as ações que visam a passagem do sistema do estado de falho para o estado operacional ou disponível ao uso (CAVALCANTE, 2018; CARTER, 1986; O'CONNOR, 1985); e manutenção preventiva, de caráter proativo, que consiste em um conjunto de atividades previamente planejadas cujo propósito principal é assegurar um nível especificado de performance, através da prevenção da ocorrência de falhas (CAVALCANTE, 2018; O'CONNOR, 1985; GLASSER, 1969).

Um problema comum na área de manutenção preventiva é a determinação de intervalos para a substituição de peças de equipamentos ou partes que podem falhar em operação. A dificuldade do plano de substituição reside no fato do tempo exato que o equipamento ou parte irá falhar ser incerto e melhor de ser descrito em termos de probabilidade (CAVALCANTE, 2018; SMITH, 1988; GLASSER, 1969). A abordagem quantitativa tradicional consiste em estabelecer os custos esperados totais de manutenção para um determinado horizonte de tempo e selecionar os valores das variáveis de decisão que minimizam esses custos (CHAREONSUK, NAGARURA & TABUCANONA, 1997).

Neste trabalho é apresentado um modelo matemático para uma política de manutenção oportuna aplicada a um sistema complexo de válvulas *Manifold*. Com este modelo é possível

estimar o custo esperado por unidade de tempo resultante da adoção de uma determinada política de manutenção. Com isto, é possível buscar boas combinações para as variáveis de decisão dessa política.

O desenvolvimento deste trabalho foi motivado por um estudo de caso sobre manutenção de válvulas *Manifold* utilizadas em um sistema de envio de massa *wafer* líquida de uma indústria alimentícia, conforme detalhamento apresentado ao longo do texto. Uma aplicação numérica é apresentada de forma a ilustrar as possibilidades de uso do modelo proposto. A partir dos resultados obtidos, é possível propor uma solução para a dificuldade de realização da política atual adotada pelo time de manutenção da indústria em questão. Ademais, também é possível demonstrar a viabilidade de utilização de políticas mais robustas para sistemas complexos em detrimento do uso exclusivo de uma política de manutenção em bloco ou por idade.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Conforme os sistemas produtivos de manufatura buscam tecnologias mais avançadas para serem mais competitivos, um planejamento de manutenção adequado se torna crucial. Outros fatores que refletem a importância desse planejamento são: crescente mecanização, crescente complexidade dos equipamentos, crescentes partes e suprimentos de inventário, controle mais rigoroso da produção, programação de entregas mais rigorosas e aumento dos requisitos de qualidade (CAVALCANTE, 2018; LEVITT, 2003; NEWBROUGH, 1967).

Por meio da manutenção preventiva é possível conservar os níveis de desempenho necessários para a garantia do alcance das metas produtivas, bem como assegurar a qualidade dos produtos através da determinação de periodicidades de substituição (CAVALCANTE & DE ALMEIDA, 2005). Essa periodicidade pode ser encontrada através de um modelo matemático, que busca representar a realidade de forma aproximada. Ainda que o modelo matemático não seja capaz de cobrir todos os aspectos, de todo modo, é uma ferramenta muito útil para guiar a tomada de decisões em manutenção (AVEN & JENSEN, 1999).

No que tange ao estudo de caso abordado neste trabalho sobre planejamento de manutenção de válvulas *Manifold* é possível observar que custo é o critério mais relevante. Isso ocorre porque além dos custos da realização da manutenção, deve ser considerado o impacto do custo de linha parada, ou seja, o quanto a indústria em questão está deixando de entregar para o consumidor porque o sistema está parado. Dessa forma, levando também em consideração que se trata de um sistema complexo, a utilização de uma abordagem que

considera que falhas implicam imediatamente em consequências de custo é o mais indicado (SCARF ET AL., 2009).

Na vivência diária desse projeto foi possível observar que há um alto custo e alta complexidade associados à realização de inspeções e às manutenções preventivas das válvulas *Manifold*, o que justificou o interesse da pesquisadora em estudar a política de manutenção oportuna como uma opção para minimização dos custos de manutenção.

## 1.2 OBJETIVOS

A finalidade desse trabalho é apresentar um modelo para apoio a determinação de uma política de manutenção oportuna aplicada a um sistema complexo de válvulas *Manifold*, que minimize os custos totais esperados de manutenção.

Objetivos específicos:

- a) Compreensão dos mecanismos de deterioração e falha do sistema estudado;
- b) Desenvolvimento de um modelo para estimar a confiabilidade do sistema completo em função da confiabilidade de seus componentes;
- c) Definição de um formato de política de manutenção adequado para o sistema em estudo;
- d) Desenvolvimento de um modelo para estimar o desempenho da política de manutenção em função das suas variáveis de decisão;
- e) Aplicação de um algoritmo apropriado para otimização (ou busca de boas soluções) para a política de manutenção;
- f) Aplicação do modelo proposto no contexto de uma indústria alimentícia.

## 1.3 METODOLOGIA

O método é uma forma de se chegar a um determinado fim. Segundo Gil (2008), o método dedutivo, de acordo com a acepção clássica, é o método que parte do geral para o particular. Parte de princípios reconhecidos como verdadeiros e indiscutíveis e possibilita chegar a conclusões de maneira puramente formal, isto é, em virtude unicamente de sua lógica. Nesta pesquisa foi feito uma varredura horizontal, e posteriormente, uma varredura vertical sobre a utilização de uma abordagem baseada em custos para definição de políticas de manutenção para sistemas complexos. Em posse destas informações e das características do sistema em estudo, foi definido um formato de política de manutenção adequado ao caso das

válvulas *Manifold* para que, em seguida, fosse desenvolvido uma modelagem matemática para determinar boas soluções para as variáveis de decisão estabelecidas. Dessa forma, o método aplicado nessa pesquisa foi o dedutivo.

A metodologia, por sua vez, é o estudo do modo para se chegar a um determinado fim. Há quatro tipos de classificação para os tipos de pesquisa: quanto à finalidade, quanto ao objetivo, quanto a natureza e quanto aos dados. Em relação à finalidade, segundo Gil (2002), a pesquisa aplicada decorre do desejo de se conhecer um determinado tema tendo em vista fazer algo de maneira mais eficiente e eficaz. Como este estudo busca encontrar um modelo para uma situação presente em uma indústria alimentícia, ele pode ser classificado como aplicado.

Com relação às pesquisas, é usual a classificação com base em seus objetivos gerais. De acordo com Gil (2002), as pesquisas explicativas têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Esse é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas. Para o estudo em questão, ele busca entender como se comportam as falhas nos componentes da válvula *Manifold*, por exemplo, se há uma degradação forte. Portanto, ele se enquadra em uma pesquisa explicativa.

Quanto à natureza, no presente trabalho foi feita a análise de várias variáveis, como custo, confiabilidade, tempo entre falhas, por meio de tratamento estatístico, o que engloba uma abordagem quantitativa. Segundo Lakatos & Marconi (2003), o ato de mensurar variáveis de pesquisa é a característica mais marcante da abordagem quantitativa.

Lakatos & Marconi (2003) também afirmam que modelos quantitativos são modelos abstratos descritos em linguagem matemática e computacional, que utilizam técnicas analíticas (matemáticas, estatísticas) e experimentais (simulação) para calcular valores numéricos das propriedades do sistema em questão. No caso desta pesquisa, estes valores numéricos são o intervalo de substituição de componentes, o valor limite de idade, o valor limite de confiabilidade e o custo esperado por unidade de tempo.

A pesquisa operacional é uma abordagem científica para auxiliar no processo de tomada de decisões, que procura determinar como melhor projetar, planejar e operar sistemas, usualmente sob condições que requerem alocações eficientes de recursos escassos (ARENALES ET AL., 2007). A abordagem baseada em custos que será utilizada nesta pesquisa é um ramo da pesquisa operacional. Consequentemente, é possível classificar o presente estudo como uma modelagem de problema em pesquisa operacional.

Por fim, em relação às técnicas de pesquisa, o foco será na documentação direta, que segundo Lakatos & Marconi (2003), constitui-se, em geral, no levantamento de dados no próprio local onde os fenômenos ocorrem. Estes dados podem ser obtidos de duas maneiras: pesquisa de campo ou pesquisa de laboratório. No caso deste estudo, foi realizada uma pesquisa de campo, que consistiu na observação do funcionamento da válvula *Manifold* e dos fatos ou fenômenos relacionados a ela, na coleta de dados referentes à válvula e no registro de variáveis que se presume relevantes para posterior análise. Vale ressaltar que as fases da pesquisa de campo requerem o estabelecimento de um modelo teórico inicial de referência, que auxiliam na determinação das variáveis e elaboração do plano geral de pesquisa.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi organizado em cinco capítulos: introdução, fundamentação teórica, revisão da literatura, modelo matemático e conclusão. O primeiro capítulo tratou da justificativa e relevância da pesquisa, seus objetivos e metodologia aplicada. Em seguida, no segundo capítulo, foi realizada uma fundamentação teórica sobre os conceitos centrais abordados, como: políticas de manutenção, com enfoque na manutenção em bloco e na manutenção oportuna; análise de sistemas complexos e otimização da manutenção, no qual foi abordado métodos heurísticos como Monte Carlo e *PSO*. No terceiro capítulo, por sua vez, foi feita uma revisão da literatura a partir da análise de trabalhos recentes sobre a determinação de políticas de manutenção para sistemas complexos. No quarto capítulo foi apresentado o contexto e a descrição do problema relacionado a um sistema complexo de válvulas *Manifold* de uma indústria de *chocowafers*. Por meio destas informações foi desenvolvido um modelo para a política de manutenção proposta, sendo feita as devidas considerações. Ademais, uma aplicação numérica foi realizada através de heurísticas, na qual foi feita uma análise de sensibilidade dos resultados. Por fim, no último capítulo, foram apresentadas as conclusões obtidas no estudo em questão, bem como, as suas principais limitações e proposições para trabalhos futuros.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são introduzidos conceitos que auxiliam a compreender este trabalho sistematicamente. Assim, espera-se que o objetivo geral do trabalho seja alcançado após fundamentação que embase a análise requisitada.

### **2.1 MANUTENÇÃO**

A manutenção pode ser definida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas que procuram tratar os processos de natureza estocástica que podem comprometer o estado de um sistema, levando-o a um estado de falha. O estado de falha consiste na impossibilidade de o sistema continuar operando em conformidade com os requisitos estabelecidos. Os sistemas podem ser classificados em: reparáveis, quando uma ação de reparo é capaz de retornar o sistema ao estado operacional; e não reparáveis, quando, para tal, é necessário realizar uma substituição (DING & KAMARUDDIN, 2015; NAKAGAWA, 2005).

#### **2.1.1 Políticas de manutenção**

Há três tipos de políticas de manutenção de acordo com a norma NBR 5462 (1994):

- a) Manutenção corretiva: realização de uma ação reativa, visto que ocorre após a falha, tendo como objetivo colocar o sistema em operação novamente. Resulta na paralisação não planejada do sistema;
- b) Manutenção preventiva: realização de uma ação planejada, tendo como objetivo prevenir a ocorrência de falhas e reverter o processo de degradação do sistema;
- c) Manutenção preditiva: realização de uma ação planejada através do monitoramento de uma ou mais variáveis relacionadas ao estado do sistema, tendo como objetivo reduzir a frequência de ações preventivas e evitar a ocorrência de falhas. Vale ressaltar que a manutenção preditiva é um tipo de manutenção preventiva, que se vale de técnicas de análise e monitoramento do estado do sistema, a fim de identificar se há necessidade de intervenções de manutenção.

Um sistema está sempre sujeito à deterioração devido a operações contínuas. Logo, a manutenção preventiva tem um importante papel em se antecipar a eventuais falhas. A relevância da manutenção preventiva só cresce por causa das evoluções tecnológicas,

variações nas leis e regulamentações e variações do ambiente operacional (SODERHOLM, HOLMGREN & KLESJO, 2007).

A manutenção preventiva consiste em qualquer ação de manutenção que ocorre antes que a qualidade ou quantidade do produto do equipamento se deteriore. Ela refere-se, muitas vezes, ao plano de substituição de peças de equipamentos ou partes que podem falhar em operação, a menos que uma substituição seja feita a tempo. O principal problema do plano de substituição é o fato do tempo exato que o equipamento ou parte irá falhar ser incerto e melhor de ser descrito em termos de probabilidade. É importante destacar que a substituição de um item só tem sentido quando o custo de o manter em funcionamento for elevado, o nível de confiabilidade for baixo (o que acarreta vários custos operacionais) ou o equipamento estiver obsoleto (MANN, 1983).

O termo substituição refere-se à mudança de uma parte do equipamento por outra que seja nova e idêntica (TERBORGH, 1949). Para a definição de uma política de substituição é relevante analisar se algumas hipóteses, definidas por Cox (1962), são satisfeitas:

- a) A performance do equipamento não varia ao longo do tempo, ou seja, o equipamento é tão bom quanto novo desde que esteja funcionando. O equipamento só possui dois estados: falho ou operacional. Há um valor fixo para os custos envolvidos;
- b) A capacidade de trabalho não é um problema visto que não há registros em espera aguardando reparo;
- c) Quando há uma substituição, a distribuição de falha de um novo componente é a mesma do que o que foi substituído;
- d) A distribuição do tempo de falha pode ser modelada;
- e) Na ausência de dados, a distribuição de tempo de falha pode ser deduzida através do conhecimento do especialista.

Dependendo da política de substituição em questão, as substituições podem ser feitas em duas ocasiões distintas:

- a) Quando a substituição é um resultado de uma falha e corresponde a um procedimento de manutenção corretiva;
- b) Quando há uma substituição que antecipa a falha e corresponde a uma manutenção preventiva.

Vale ressaltar que só faz sentido antecipar a falha quando há vantagens em relação a isso, ou seja, quando o custo médio de manutenção corretiva é maior que o custo de manutenção preventiva (CAVALCANTE & DE ALMEIDA, 2007). Outro ponto relevante é que, de acordo com Pham e Whang (1996), em geral, a substituição de um componente falho

por um novo é uma manutenção perfeita, que consiste em uma ação de manutenção que restaura a condição do sistema a um estado tão bom quanto novo.

É muito comum encontrar na literatura pesquisadores afirmando que a aplicação de um plano de manutenção efetivo implica em: decréscimo do custo, aumento da qualidade do produto, aumento da disponibilidade do equipamento e aumento do atendimento das medidas de segurança. Entretanto, apesar dos diferentes efeitos da aplicação de um plano de manutenção, a maioria dos modelos ainda está atrelada a uma análise mais restrita, no qual só o custo é observado (VAN DER WEIDE *ET AL.*, 2010).

Em sistemas de manufatura, perdas devido à indisponibilidade do maquinário podem ser mitigadas pelo aumento da produção acima da capacidade normal ou pela tomada de medidas que evite que a indisponibilidade seja notada pelos clientes. Em geral, falha implica em atrasos de produção, retrabalho, ineficiência, desperdícios, horas extras e/ou problemas de estoque, que são facilmente convertidos em custos. Isso explica o porquê da maioria dos modelos de tomada de decisão neste contexto serem baseados em custos (DE ALMEIDA *ET AL.*, 2015).

### **2.1.2 Conceitos básicos de confiabilidade**

Em seu sentido mais amplo, confiabilidade está relacionada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, ou seja, com ausência de quebras ou falhas (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009). Segundo Leemis (1995), confiabilidade pode ser definida da seguinte forma: “A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas”.

Dessa forma, confiabilidade é definida como uma probabilidade. Isto significa que todas as confiabilidades devem apresentar valores entre zero e um e que os axiomas clássicos da probabilidade podem ser aplicados em cálculos de confiabilidade. Para a correta especificação do modelo matemático que representa o desempenho de um item, deve-se definir o que se entende como desempenho adequado. O modelo matemático mais simples para representar a condição de um item é o binário, que considera dois estados: funcionamento (apresenta desempenho adequado) ou falha (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Segundo Fogliatto & Ribeiro (2009), essa probabilidade é uma função de um período de tempo, o que implica em cinco consequências:

- a) O analista deve definir uma unidade de tempo para a realização das análises;

- b) Os modelos que descrevem os tempos até falha utilizam a variável aleatória  $T$  para descrever o tempo de falha de um item;
- c) O termo tempo não deve ser interpretado literalmente, já que em muitos casos o número de ciclos pode representar o tempo até falha de um item;
- d) O conceito de confiabilidade deve ser associado à duração de uma missão;
- e) A determinação do que deveria ser usado para medir a vida de um item nem sempre é óbvia.

De acordo com o texto das normas NBR ISO-8402 (1994) e 5462 (1994), os principais conceitos associados à confiabilidade são:

- a) Qualidade: Totalidade de características e aspectos de um produto ou serviço que tornam possível a satisfação de necessidades implícitas e explícitas associadas ao produto ou serviço;
- b) Disponibilidade: Capacidade de um item, mediante manutenção apropriada, desempenhar uma função requerida em um determinado instante de tempo ou em um período predeterminado. Em unidades não reparáveis, os conceitos de disponibilidade e confiabilidade se equivalem;
- c) Manutenibilidade: Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, mediante condições preestabelecidas de uso, quando submetido à manutenção sob condições predeterminadas e usando recursos e procedimentos padrão.

Segundo Fogliatto & Ribeiro (2009), as três medidas de confiabilidade mais comumente usadas são: função de confiabilidade  $R(t)$ , função de risco  $h(t)$  e tempo médio até falha  $MTTF$  (*Mean Time To Failure*).

O tempo até falha de uma unidade é o tempo transcorrido desde o momento em que a unidade é colocada em operação até a sua primeira falha. Convenciona-se  $t = 0$  como início da operação do sistema. Por estar sujeito a variáveis aleatórias, o tempo até a falha é definido como uma variável aleatória, designada por  $T$ . A função de distribuição de probabilidade acumulada,  $F(t)$ , denota a probabilidade de falha de uma unidade que segue uma distribuição de densidade de probabilidade,  $f(t)$ , em uma missão de duração menor ou igual a  $t$ . A função de confiabilidade  $R(t)$ , por sua vez, informa a probabilidade de a unidade apresentar sucesso na operação, isto é, ausência de falhas, no intervalo de tempo  $(0, t)$  e ainda estar funcionando no tempo  $t$ . A função de confiabilidade é também denominada função de sobrevivência.  $F(t)$

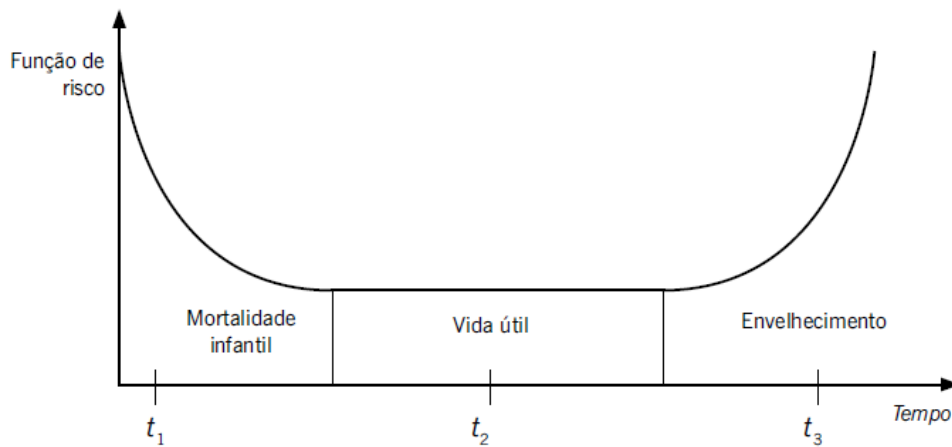
e  $R(t)$  podem ser obtidas a partir de  $f(t)$  de acordo com as equações (2.1) e (2.2) (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u)du, t > 0 \quad (2.1)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u)du = \int_t^{+\infty} f(u)du \quad (2.2)$$

A função de risco  $h(t)$  consiste na quantidade de risco associada a uma unidade de tempo  $t$ . Ela é bastante útil na análise do risco a que uma unidade está exposta ao longo do tempo, o que serve como base de comparação entre unidades com características distintas. Existem três classificações básicas para a função de risco: crescente, em que a incidência de risco cresce com o tempo; decrescente, em que a incidência de risco decresce com o tempo; e constante ou estacionária, em que a unidade está exposta a uma mesma quantidade de risco em qualquer momento do tempo. Produtos manufaturados costumam apresentar uma função de risco dada pela ocorrência sucessiva das três classificações anteriores, ilustrada na Figura 1, e conhecida como curva da banheira (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Figura 1 – Exemplo De Curva Da Banheira



Fonte: Adaptado de Fogliatto; Ribeiro (2009, p. 11).

Deficiências no processo de manufatura levam a falhas precoces, que se concentram no início de sua vida, na chamada fase de mortalidade infantil. As falhas que incidem na fase de vida útil do produto devem-se tipicamente a condições extremas no ambiente de operação do produto e podem ocorrer, uniformemente, em qualquer momento. Já a deterioração do produto frequentemente leva a falhas por desgaste, concentradas no final da vida útil do produto, na fase de envelhecimento. A função  $h(t)$  pode ser definida pela equação (2.3) (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (2.3)$$

O tempo médio até falha de uma unidade, designado por *MTTF*, trata-se do valor esperado da variável *T* e pode ser definida pela equação (2.4) (Fogliatto & Ribeiro, 2009).

$$MTTF = E(T) = \int_0^{+\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (2.4)$$

A Figura 2, originalmente proposta por Leemis (1995), apresenta a relação entre as medidas de confiabilidade discutidas anteriormente.

Figura 2 – Relação Entre Medidas De Confiabilidade

	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$f(t)$	•	$\int_t^{\infty} f(u)du$	$f(t) / \int_t^{\infty} f(u)du$
$R(t)$	$-R'(t)$	•	$-R'(t) / R(t)$
$h(t)$	$h(t)e^{-\int_0^t h(u)du}$	$e^{-\int_0^t h(u)du}$	•

Fonte: Adaptado De Fogliatto; Ribeiro (2009, p. 13).

A definição mais usual de confiabilidade de uma unidade é dada em termos de sua probabilidade de sobrevivência até um tempo *t* de interesse. A determinação de tal probabilidade é possível através da modelagem dos tempos até falha da unidade em estudo. Conhecendo-se a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta a esses tempos, é possível estimar a probabilidade de sobrevivência da unidade para qualquer tempo *t*. As distribuições de probabilidade usadas em estudos de confiabilidade podem apresentar até três parâmetros: localização, usado para deslocar a distribuição de probabilidade ao longo do eixo do tempo; escala, usado para expandir ou contrair o eixo do tempo; e forma, que é assim designado por afetar a forma da função densidade (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Duas distribuições de probabilidade frequentemente utilizadas para descrever tempos até falhas de componentes e sistemas são: exponencial, única distribuição contínua com função de risco constante e *Weibull*, apropriada na modelagem de tempos até falha apresentando funções de risco constante, estritamente crescente ou estritamente decrescente.

Essas distribuições podem ser definidas pelas equações (2.5) e (2.6) (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

$$f(t) = \lambda e^{\lambda t} \quad (2.5)$$

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad (2.6)$$

Uma importante propriedade da distribuição exponencial diz respeito à ausência de memória de unidades com tempos de falha modelados por essa distribuição. Isto é, supõem-se unidades com uma mesma confiabilidade  $R(t)$  para qualquer  $t$ , independente da sua idade ou tempo de uso. Tal suposição é aplicável para alguns componentes elétricos, que costumam apresentar falhar causadas por eventos aleatórios (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

A distribuição *Weibull* possui o  $\gamma$  como parâmetro de forma e o  $\theta$  como parâmetro de escala. Essa distribuição modela uma ampla variedade de situações em que unidades apresentam funções de risco distintas. O tipo de função de risco da *Weibull* é definido pelo seu parâmetro de forma. Quando  $\gamma < 1$ ,  $h(t)$  é decrescente, quando  $\gamma = 1$ ,  $h(t)$  é constante e a *Weibull* transforma-se na exponencial e quando  $\gamma > 1$ ,  $h(t)$  é crescente. A função de risco crescente está relacionada às falhas por desgaste, que são muito comuns em equipamentos e componentes mecânicos (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

### 2.1.3 Análise de sistemas complexos

Sistema é todo o conjunto de componentes interconectados segundo um projeto predeterminado, de forma a realizar um conjunto de funções de maneira confiável e com bom desempenho. O tipo e a qualidade dos componentes usados, bem como a forma como estão arranjados influí diretamente no desempenho e na confiabilidade do sistema por eles composto. O diagrama de blocos de um sistema representa a forma em que os  $n$  componentes do sistema estão interconectados (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Os dois principais arranjos de um sistema são série e paralelo. Em um sistema em série,  $n$  componentes estão conectados de tal forma que a falha de qualquer componente resulta na falha de todo o sistema. Por sua vez, em um sistema em paralelo, todos os componentes devem falhar para que o sistema falhe. Considerando que  $P(x_n)$  é a probabilidade do  $n$ -ésimo componente estar operante,  $P(\overline{x_n})$  é a probabilidade do  $n$ -ésimo componente não estar operante e que os  $n$  componentes são independentes, a confiabilidade desses dois sistemas,  $R_s$ , pode ser descrita respectivamente pelas equações (2.7) e (2.8) (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

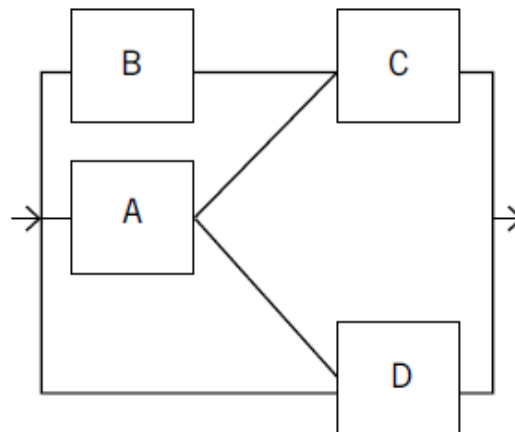
$$R_s = P(x_1)x \dots xP(x_n) = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.7)$$

$$R_s = 1 - (P(\bar{x}_1)x \dots xP(\bar{x}_n)) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2.8)$$

A aplicação prática da equação (2.7) conduz a um cenário no qual a confiabilidade do sistema decresce rapidamente à medida que o número de componentes aumenta. O limite superior na confiabilidade do sistema é dado pelo componente menos confiável no arranjo em série. A análise da equação (2.8) pressupõe que todos os componentes são ativados quando o sistema é ativado e que falhas não afetam a confiabilidade dos componentes sobreviventes, o que caracteriza um arranjo paralelo puro. Outros tipos de arranjo em paralelo são: carga compartilhada, no qual a função de risco dos componentes sobreviventes aumenta à medida que falhas ocorrem e redundância em *standby*, no qual o componente em *standby* só é ativado se um dos componentes em operação vier a falhar (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Sistemas complexos são aqueles que não podem ser modelados (ou são de modelagem difícil) como combinações de sistemas simples. Nesses sistemas, a natureza das interconexões entre componentes não permite uma determinação direta e generalizável de sua expressão de confiabilidade, sendo necessário, para tanto, a utilização de métodos especiais como: decomposição, *tie set* e *cut set*, tabela booleana e tabela de redução. Um exemplo de sistema complexo é mostrado na Figura 3 (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Figura 3 – Diagrama De Blocos De Um Sistema Complexo



Fonte: Adaptado de Fogliatto; Ribeiro (2009, p. 88).

Um *tie set* ou caminho crítico é um conjunto de componentes que estabelece um caminho que assegura a operação do sistema, enquanto um *cut set* ou corte mínimo é um conjunto de componentes que, uma vez removidos do sistema, interrompe todas as conexões entre os pontos extremos inicial e final do sistema. Um *cut set* mínimo é aquele que não



contém nenhum outro *cut set* dentro de si. Logo, o método *tie set* consiste em simular um cenário no qual só os componentes no *tie set* estão operantes e, no caso de qualquer componente do *tie set* falhar, o sistema falha como um todo e o método *cut set* consiste em considerar que a não-confiabilidade do sistema é dada pela probabilidade de que ao menos um *cut set* mínimo ocorra (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Na análise de um sistema composto por vários componentes é importante identificar componentes cujo funcionamento é determinante no funcionamento do sistema como um todo. Tal identificação pode ser feita através de medidas quantitativas da importância dos componentes, em termos de suas confiabilidades. Através dessas medidas, engenheiros de manutenção podem estabelecer uma lista de prioridades para a inspeção preventiva de componentes. A importância de um componente em um sistema depende da sua localização no sistema e da sua confiabilidade em um dado período (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

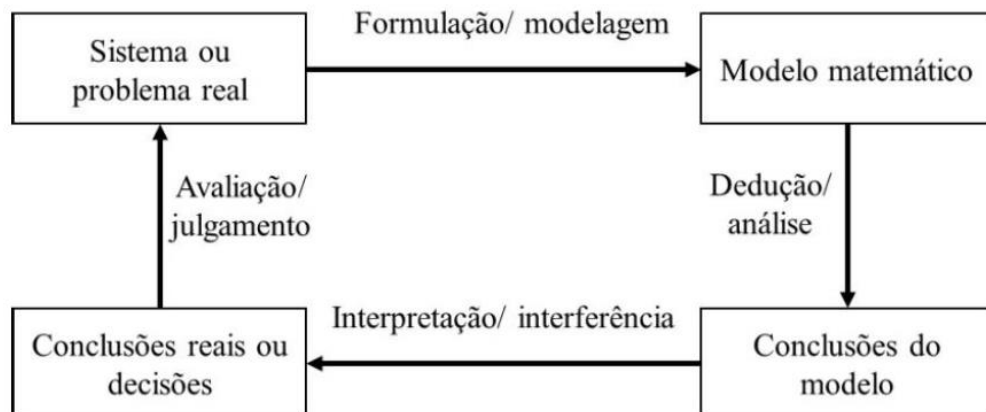
## 2.2 MODELO

Uma forma de se representar a realidade é através de modelos. Neste tópico, são discutidos conceitos sobre modelagem matemática e otimização da manutenção. Além disso, são apresentados modelos matemáticos que auxiliam a alcançar o objetivo deste texto.

### 2.2.1 Modelagem matemática e otimização da manutenção

Segundo Arenales *et al.* (2007), modelo é um objeto abstrato que busca reproduzir as principais características de um objeto real, a fim de representá-lo. A partir de uma aplicação e da análise dos resultados obtidos com o modelo, é possível tomar decisões acerca do problema real ainda que esse modelo não seja capaz de cobrir todos os aspectos. A Figura 2.4 representa o processo de modelagem matemática.

Figura 4 – Processo De Modelagem



Fonte: Adaptado de Alberti (2018).

A otimização da manutenção pode ser realizada em duas etapas. Inicialmente, é feita a definição de uma ferramenta de análise, normalmente um modelo matemático analítico ou modelo de simulação, tendo em vista a avaliação do desempenho de uma política de manutenção aplicada a um determinado sistema. Em seguida, é feita a aplicação de métodos de otimização para a busca de soluções, que podem ser exatos, aproximados ou heurísticos (VAN HORENBEEK, PINTELON & MUCHIRI, 2010; HILLIER & LIEBERMAN, 2006).

Os modelos matemáticos analíticos utilizam uma linguagem matemática considerando um conjunto de pressupostos para descrever um sistema e apresentam a vantagem de normalmente permitir o uso de métodos de otimização exatos ou aproximados. Por sua vez, os modelos de simulação buscam representar as operações de um sistema real ao longo do tempo, sendo boas alternativas para a análise de sistemas complexos. Nesses modelos é mais comum o uso de métodos heurísticos (ALRABGHI & TIWARI, 2015; DING & KAMARUDDIN, 2015; AVEN & JENSEN, 1999).

A modelagem matemática e a otimização possuem uma grande influência na definição da frequência das ações de manutenção. Segundo Ding & Kamaruddin (2015), os modelos utilizados para definir políticas de manutenção geralmente possuem os quatro seguintes aspectos:

- a) Descrição do sistema em estudo;
- b) Descrição de como o sistema se deteriora ao longo do tempo e as consequências disso;
- c) Indicação das alternativas de ação;
- d) Definição de uma função objetivo ou de uma ferramenta de análise a partir da qual se busca derivar a política de manutenção mais adequada.

### 2.2.2 Monte Carlo e PSO (Particle Swarm Optimization)

Um método comumente aplicado na literatura é o de Monte Carlo, que requer o estabelecimento de um modelo matemático em função de parâmetros de influência individual e a definição do número de simulações necessárias do modelo. A partir disso é possível realizar sucessivas simulações para identificar heurísticamente a função de densidade de probabilidade que corresponde a cada parâmetro de entrada do modelo. Basicamente, Monte Carlo se trata de uma busca randômica que pode ser utilizado como heurística para busca de soluções (BIPM, IEC, IFCC *ET AL.*, 2008).

Outro método heurístico de grande destaque pela geração de resultados satisfatórios com tempo de processamento reduzido é o *PSO (Particle Swarm Optimization)*. Esse método surgiu da observação do comportamento social de bandos de aves e cardumes de peixes (KENNEDY & EBERHART, 1995). As partículas, consideradas como possíveis soluções, se comportam como pássaros a procura de alimentos, utilizando o aprendizado próprio (componente cognitiva) e o aprendizado do enxame (componente social). A qualidade da solução representada por uma partícula é o valor de uma dada função objetivo na posição desta partícula. Vale ressaltar, que o termo partícula é utilizado, em analogia à física, por possuir posição e velocidade bem definidas, mas não possuir massa nem volume (TAVARES, NEDJAH & MOURELLE, 2015).

A cada iteração, a posição e a velocidade das partículas são atualizadas de acordo com as equações (2.9) e (2.10) (TAVARES, NEDJAH & MOURELLE, 2015).

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \quad (2.9)$$

$$v_i^{(t+1)} = wv_i^{(t)} + c_1r_1(pbest_i - x_i^{(t)}) + c_2r_2(gbest - x_i^{(t)}) \quad (2.10)$$

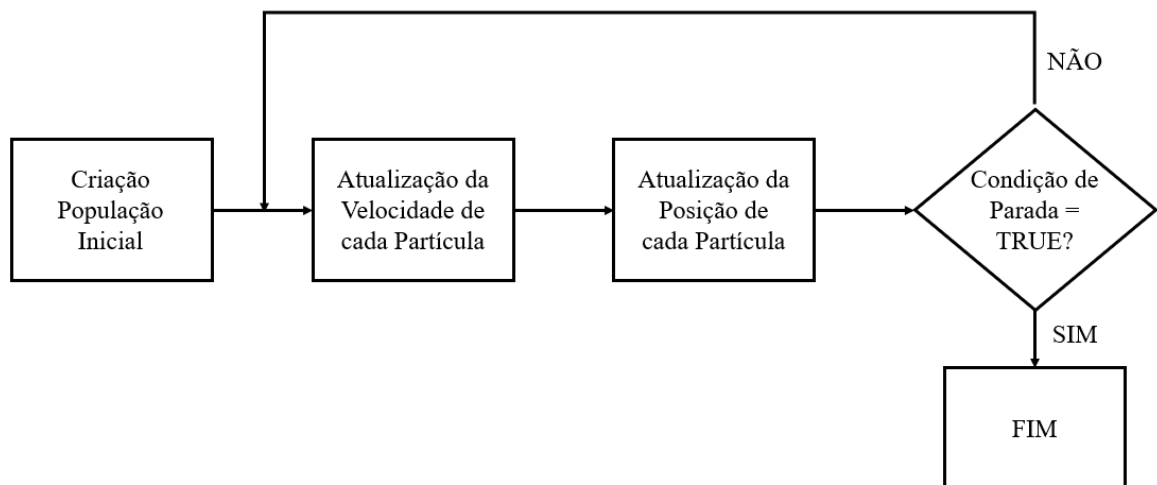
Sendo  $x_i^{(t)}$  e  $v_i^{(t)}$  a posição e a velocidade da partícula  $i$  no tempo  $t$  respectivamente, enquanto  $x_i^{(t+1)}$  e  $v_i^{(t+1)}$  representam a posição e a velocidade da partícula  $i$  no tempo  $t + 1$  respectivamente. O vetor  $v_i^{(t+1)}$  é a soma de três componentes: inércia, memória e cooperação. A inércia mantém a partícula em uma direção idêntica à que ela vinha seguindo. A memória conduz a partícula na direção da melhor posição que a partícula encontrou até o momento. Por sua vez, a cooperação conduz a partícula na direção da melhor posição descoberta pelo enxame (TAVARES, NEDJAH & MOURELLE, 2015).

O  $w$  é uma constante que representa a inércia da partícula,  $c_1$  e  $c_2$  são constantes que atribuem pesos às componentes cognitiva e social respectivamente,  $r_1$  e  $r_2$  são números

aleatórios entre 0 e 1,  $pbest_i$  é a melhor posição encontrada pela partícula  $i$  e  $gbest$  é a melhor posição encontrada pelo bando (TAVARES, NEDJAH & MOURELLE, 2015).

Essas atualizações da posição e da velocidade das partículas vão se repetindo até que o critério de parada seja atingido. Esse critério pode ser o número máximo de iterações ou um valor desejado da função objetivo, por exemplo. O fluxograma do algoritmo *PSO* pode ser visto na Figura 5 (TAVARES, NEDJAH & MOURELLE, 2015).

Figura 5 – Fluxograma do *PSO*



Fonte: Adaptado de Taves; Nedjah; Mourelle (2015).

Segundo Jordehi & Jasni (2013), algumas características do *PSO* que garantem a geração de resultados satisfatórios como foi mencionado anteriormente são:

- a) Em comparação com outras heurísticas, possui menos parâmetros a serem ajustados pelo usuário;
- b) Seus conceitos básicos são muito simples. Além disso, sua codificação é muito fácil;
- c) Fornece uma convergência rápida;
- d) Exige menos carga computacional em comparação com a maioria das outras heurísticas;
- e) Oferece alta precisão;
- f) Em comparação com outras heurísticas, o comportamento computacional do *PSO* é menos afetado pelas soluções iniciais;
- g) Seu comportamento não é altamente afetado pelo aumento da dimensionalidade;
- h) É eficiente para lidar com múltiplos objetivos e múltiplas restrições;
- i) Fornece muitas estratégias eficientes para mitigar a convergência prematura.

### 2.2.3 Manutenção em bloco e Manutenção oportuna

Como já foi mencionado, a manutenção preventiva, muitas vezes, refere-se ao plano de substituição de peças de equipamentos que podem falhar em operação, a menos que uma substituição seja feita a tempo (DE ALMEIDA & DE SOUZA, 2001; GLASSNER, 1969; JORGENSEN & MCCALL, 1963). Entre as políticas de substituição, destaca-se o modelo de substituição em bloco, um tipo de *TBM* (*Time-based maintenance*), que especifica que todas as unidades devem ser substituídas periodicamente por unidades idênticas, porém novas, a cada período de tempo  $t$ ,  $2t$ ,  $3t$ , permitindo também substituições imediatas de itens que venham a falhar antes do tempo previsto para a execução da manutenção. Vale ressaltar que é mais vantajoso realizar a substituição de itens similares em grupo ao invés da substituição individual quando essa política resulta em custos menores devido às economias de escala (CAVALCANTE, 2018).

A política de substituição em bloco supõe que há muitos itens similares que estão sujeitos a falhas. Além disso, todas as vezes que um item falha, este é substituído por um novo com um custo  $C_a$ . Essas substituições são feitas a intervalos fixos de tempo, que proporcionam custos unitários de substituições  $C_b$  menores do que os custos relativos às falhas  $C_a$ . Além disso, a função densidade de probabilidade dos tempos de falha dos itens é conhecida e  $N$  é o total de itens que compõe o grupo (CAVALCANTE, 2018).

Por conseguinte, deseja-se saber o intervalo entre substituições em bloco,  $T$ , que minimiza a razão custo total por unidade de tempo,  $B(t)$ . Considerando que  $M(t)$  é a função que representa o número esperado de vezes que um item falha durante o intervalo  $(0, t)$  e que o valor esperado do custo total para a substituição em bloco,  $C(T)$  é a composição do custo relativo a uma substituição ao final do tempo  $T$  e o custo esperado das falhas durante o intervalo  $(0, t)$ , é possível definir  $B(t)$  de acordo com a equação (2.11) (CAVALCANTE, 2018).

$$B(t) = \frac{C(t)}{t} = \frac{NCb + CaM(t)}{t} \quad (2.11)$$

Em um sistema de produção, algumas paradas podem criar oportunidades para fazer manutenção preventiva a um custo menor ou com menos interrupção do que a manutenção preventiva programada (WANG, SCARF & SMITH, 2000). Essa situação é caracterizada como uma manutenção oportuna, que pode ser definida como um método sistemático de coleta, investigação e planejamento de atividades com objetivo de gerar um conjunto de

tarefas de manutenção para agir no aparecimento de uma oportunidade (DAY & GEORGE, 1982).

De acordo com Dekker & Smeitink (1991), muitas vezes, as oportunidades surgem de dois tipos de dependências:

- a) Dependência econômica: que consiste na economia de escala gerada por meio da realização da manutenção em dois componentes ao mesmo tempo ao invés da manutenção nesses dois componentes separadamente;
- b) Dependência estrutural: que consiste na situação de que se um componente para o outro também para.

Políticas de manutenção agrupadas também exploram essas dependências, mas a manutenção oportuna se diferencia das políticas citadas anteriormente por buscar otimizar a manutenção de um ou de alguns componentes por meio de paradas que surgem devido a outros componentes ao invés de buscar otimizar o conjunto de componentes como um todo (PENG & ZHU, 2017; VU ET AL., 2015; WILDEMAN, DEKKER & SMIT, 1997).

Por fim, segundo Samhuri (2009), a manutenção oportuna pode ser dividida em dois objetivos principais:

- a) Estender a vida útil do equipamento ou, pelo menos, o tempo médio até a próxima falha, o que gera um aumento na disponibilidade do sistema;
- b) Obter uma economia de escala, de forma a aproveitar os recursos já dispendidos na ação de correção ou prevenção da falha.

## 2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado a base teórica para o desenvolvimento do estudo de caso. Inicialmente, foi exposto o conceito de manutenção, com enfoque na definição das principais políticas de manutenção existentes, bem como, o conceito de confiabilidade com um viés para a análise de sistemas complexos. Em seguida, foi feita uma abordagem do contexto da modelagem e otimização matemática, no qual foi discutido os conceitos de Monte Carlo, de um algoritmo de enxame de partículas (*PSO*, do inglês, *Particle Swarm Optimization*), manutenção em bloco e manutenção oportuna.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Sistemas industriais estão sujeitos à degradação devido ao uso e à exposição aos fatores ambientais. Esta degradação pode gerar falhas no sistema e, conseqüentemente, problemas de segurança, de qualidade e de indisponibilidade de equipamentos. Há algumas décadas, ações de manutenção eram realizadas de forma reativa, após a ocorrência de falhas, sendo consideradas como algo de difícil gerenciamento. Atualmente, manutenção é amplamente reconhecida como uma função administrativa crítica e essencial. As organizações constantemente reconhecem que podem aumentar sua eficiência e confiabilidade por meio do planejamento mais eficiente e eficaz de intervenções de manutenção (ALYSOUF, 2007).

Em geral, sistemas podem ser divididos em: simples, estocásticos e complexos. Os simples são caracterizados por um pequeno número de elementos. Os estocásticos possuem muitos elementos e variáveis, mas os acoplamentos entre eles são fracos ou aleatórios. Os complexos, por sua vez, também possuem muitos elementos, porém com forte acoplamento entre eles, um exemplo seria os sistemas de naves espaciais (JIA *ET AL.*, 2018; JIA *ET AL.*, 2017; ZHAO, LI & SUN, 2015).

A manutenção preditiva para sistemas complexos está atraindo muita atenção nos últimos anos devido ao rápido desenvolvimento da tecnologia de sensores e de modelos de degradação estocásticos. Com o monitoramento do estado do sistema, uma ação de manutenção pode ser agendada antes que o limiar de uma falha grave seja cruzado (JARDINE, LIN & BANJEVIC, 2006). Por sua vez, o emprego de otimização na área de manutenção indica um caminho para aumentar o ganho econômico e a geração de receitas nas indústrias globalmente (REGATTIERI *ET AL.*, 2015; BLAKELEY *ET AL.*, 2003).

Castro, Basten & Van Houtum (2020) elaboraram uma estratégia de manutenção para um sistema complexo que consiste em equipamentos não monitorados e monitorados. Neste caso só é possível atuar nos componentes não monitorados em caso de falha. Já a atuação nos componentes monitorados ocorre quando o nível de degradação destes componentes atinge um limite. A estratégia implementada nesse estudo foi a manutenção oportuna, o que significa que uma intervenção de manutenção para um componente pode ser usada como uma oportunidade para manutenção de componentes monitorados. Essas ações incorrem em diferentes custos, e o objetivo principal do artigo foi avaliar a taxa de custo esperada do sistema por meio de técnicas de renovação e de semi-regeneração.

Zhu *et al.* (2017) apresentaram um novo modelo de manutenção preditiva para sistema de componente único com oportunidades, que surgem através de paradas programadas e não

programadas, para a execução de ações de manutenção sem separar os custos de inatividade e *setup*. Esse artigo traz um eficiente e preciso procedimento de avaliação da política de controle adotada, bem como mostra que uma aproximação desse procedimento pode ser utilizada para otimizar o limite de controle. Vale ressaltar que, apesar de se tratar de um modelo para sistema de componente único, ele também pode ser utilizado para sistema com múltiplos componentes.

Poppe, Boute & Lambrecht (2018) combinaram manutenção preditiva em um componente monitorado com manutenção preventiva periódica e manutenção corretiva em outros componentes da mesma máquina. Foram implementados dois limites nos níveis de degradação para decidir quando atender o componente monitorado: quando o nível de degradação ultrapassa um primeiro limite “oportunista”, o componente será atendido junto com outros componentes, quando o nível de degradação ultrapassar um segundo limite de intervenção, uma ação adicional de manutenção é planejada a fim de evitar uma falha. Ambos os limites foram otimizados para minimizar os custos de manutenção do componente monitorado ou para minimizar o tempo de inatividade da máquina devido à manutenção no componente monitorado.

Zhu & Xiang (2020) realizaram uma otimização utilizando manutenção preventiva para um problema de um sistema com múltiplos componentes. Inicialmente, foi desenvolvido um modelo inteiro estocástico de vários estágios com o objetivo de minimizar o custo total de manutenção em um horizonte de planejamento finito. Em seguida, foi investigado as propriedades estruturais de um modelo de dois estágios.

Yuan *et al.* (2019) propuseram um modelo de manutenção oportuna para resolver o problema de peças múltiplas, alto custo de desmontagem e manutenção imperfeita em um sistema complexo de múltiplos componentes. A simulação de Monte Carlo foi usada para resolver o modelo e obter o limite de tempo de manutenção oportuna ideal.

Bris *et al.* (2017) descreveram um novo método para definição de uma estratégia de manutenção ótima de um sistema complexo respeitando uma determinada restrição de confiabilidade. O problema discreto de otimização de custos foi resolvido considerando que as variáveis de decisão são parâmetros de manutenção alteráveis e que podem ser selecionados de forma otimizada a partir de um conjunto de possíveis modos de manutenção realistas. Outro artigo que abordou eventos discretos foi o de Alrabghi & Tiwari (2015). Este artigo propôs uma modelagem de sistemas de múltiplos componentes não idênticos com suposições restritivas sobre o número de unidades ou de suas características de manutenção através de simulação de eventos discretos.



Ren, Wang & Gan (2019) investigaram uma política de manutenção para sistemas em paralelo, no qual os componentes desses sistemas possuem parâmetros de custos iguais. Este artigo considerou a taxa de rejeição como um indicativo do grau de degradação do equipamento, e essa taxa foi obtida por detecção. A estratégia de manutenção proposta consistiu na definição de dois valores de limite que minimizam o custo total esperado através do uso de um algoritmo genético.

Alberti *et al.* (2018) desenvolveram uma política de inspeção e substituição para um sistema de proteção que incorporou múltiplos aspectos da qualidade da manutenção. Um modelo que considera degradação em três estágios distintos foi utilizado, com um estado defeituoso precedendo a falha. Foi avaliado o impacto dos aspectos da qualidade da manutenção sobre os custos e perdas da produção. Além disso, a indução de defeitos foi considerada um fator determinante na determinação da política de otimização de custos.

Em relação aos modos de falha, Cao *et al.* (2020) explorou como o processo de envelhecimento afeta dois processos de falha dependentes e competitivos no contexto de sistemas com múltiplos componentes. O processo de envelhecimento é o resultado do declínio da capacidade intrínseca do produto para resistir às tensões expostas e o choque aleatório é considerado como causador de mudanças abruptas na probabilidade de transição para uma certa etapa. Neste artigo, o processo de falha foi determinado pela junção da probabilidade cumulativa de envelhecimento e pelo choque aleatório.

Yousefi *et al.* (2019) formularam e resolveram um modelo de otimização para determinar limites de falhas sob condição e intervalos de inspeção para sistemas de múltiplos componentes, no qual cada componente experimenta múltiplos processos de falha devido à exposição simultânea à degradação e às cargas de choque.

### 3.1 POTENCIAL DE INOVAÇÃO

Segundo Wang (2002), estudos sobre otimização da manutenção antes de 2002 consideravam principalmente políticas de manutenção preventiva como o *TBM*. Os tipos de dependências entre componentes considerados naquela época eram: econômica e de falha, sendo a última um tipo específico de dependência estocástica. A dependência estrutural, tanto do ponto de vista técnico como de desempenho, não chamou a atenção (JONGE & SCARF, 2020).

Desenvolvimentos substanciais no campo da otimização da manutenção podem ser observados desde a revisão de Wang (2002). Várias extensões das políticas tradicionais de

manutenção baseadas no tempo foram consideradas e alguns estudos foram dedicados aos efeitos das incertezas nas especificações do modelo. Nos últimos anos, muitos estudos passaram a considerar uma configuração baseada na condição, no qual tanto situações com monitoramento contínuo quanto com inspeções são analisadas. Ademais, o uso da manutenção preditiva em conjunto com a manutenção oportuna se tornou cada vez mais evidente em sistemas complexos (JONGE & SCARF, 2020).

Em relação à utilização da manutenção oportuna, é possível se basear em limites de controle relacionados à idade do componente (SARKER & FAIZ, 2016; RADNER & JORGENSON, 1963) e ao *MTTF* (DING & TIAN, 2012; DING & TIAN, 2011). Shafiee, Finkelstein & Berénguer (2015) e Pham & Wang (2000) propuseram vários modelos de manutenção oportuna em que todos os componentes são substituídos devido à uma falha grave dos componentes. Vale ressaltar que estes trabalhos consideram que o monitoramento das condições de alguns componentes é difícil e somente possível quando eles são substituídos (CANH VU ET AL., 2020).

Desse modo, esta pesquisa tem o potencial de oferecer mais uma contribuição à literatura em relação à aplicação de uma política de manutenção oportuna para sistemas complexos. Ademais, essa contribuição se torna mais relevante por se tratar de um estudo de caso, já que, segundo Jonge & Scarf (2020), apenas alguns artigos aplicaram seus modelos em um estudo de caso com dados da vida real.

Por fim, ainda que haja inúmeros modelos de manutenção que abrangem situações mais complexas, inclusive alguns já estão sendo associados com algoritmos genéticos, no dia a dia, as indústrias, por vezes, preferem fazer uso exclusivo de uma política de manutenção em bloco, por exemplo, que nem sempre é o mais apropriado. Desta forma, esta pesquisa poderá mostrar a viabilidade da utilização de políticas mais robustas através da associação de uma política de manutenção em bloco com uma política de manutenção oportuna.

### 3.2 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo teve como objetivo a apresentação de estudos recentes sobre os elementos centrais deste trabalho, dando ênfase à determinação e aplicação de políticas de manutenção para sistemas complexos. Ademais, foi abordado o potencial de inovação deste estudo, no qual destaca-se: a contribuição à literatura através da aplicação de uma política de manutenção em um sistema complexo real e a viabilização da utilização de políticas de manutenção mais robustas.

## 4 MODELO MATEMÁTICO -MOTIVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é desenvolvido o estudo de caso.

### 4.1 CONTEXTO DO PROBLEMA

Em uma indústria alimentícia, mais precisamente em uma indústria de *chocowafer*, o processo de produção de *wafer* consiste no depósito da massa líquida em placas metálicas abertas do forno, sendo que estas se fecham distribuindo a massa por toda a placa, e a alta temperatura aplicada possibilita sua cocção. As placas de *wafer*, depois de retiradas do forno resfriam e são superpostas recebendo entre elas finas camadas de recheio. O *wafer* é um tipo de biscoito e, segundo Duncan (1998), podem ser chamados de biscoitos todos os produtos alimentícios cujo principal ingrediente é a farinha de trigo que, misturada ao açúcar, à gordura e aos demais ingredientes, gera uma massa homogênea; quando levada ao forno, a massa apresenta um produto final com umidade inferior a 4% que, se embalados adequadamente podem manter-se em condições satisfatórias de consumo por longos períodos.

Segundo Duncan (2000), a execução operacional dos processos de produção de biscoito pode ser dividida em duas etapas: preparação da massa e cocção ou cozimento da massa. Na fase de preparação da massa do *wafer*, inicialmente, é feita a dosagem dos ingredientes mediante uma formulação pré-definida. Esta dosagem pode ser executada manualmente em balanças com um bom nível de precisão ou em sistemas de dosagem automática, que utilizam, por exemplo, conceitos como o *loss-in-weight* ou o *gain-in-weight* para dosagem de farinha de trigo. Depois de dosados, estes ingredientes são colocados ou enviados para um equipamento denominado “masseira” ou “*mixer*” onde será preparada uma massa homogênea. Para esta ação mecânica de mistura se determina o torque e as velocidades das pás do equipamento e é realizado o controle de temperatura da massa, pois essa temperatura é fundamental para a qualidade do produto final.

Já na segunda etapa, o *wafer* adquire seu formato e suas dimensões físicas. Após a preparação da massa, a massa *wafer* é enviada para o forno, no qual é transportada por meio de uma esteira e sofre o processo de cocção. Posteriormente, o biscoito é resfriado e conduzido por esteiras transportadoras até a área de embalagem para empacotamento e encaixotamento. Antes desta fase de embalagem, os biscoitos podem ser recheados ou serem cobertos por chocolate (DUNCAN, 2000).

É possível observar que a produção de *wafer* envolve dois tipos distintos de processo de produção: produção em *batch* na preparação da massa e fluxo contínuo nas fases posteriores da fabricação e embalagem (DUNCAN, 2000). Destaca-se que qualquer problema no envio de massa para o forno automaticamente gera um impacto na performance da linha de produção e, conseqüentemente, um aumento dos custos, visto que os fornos industriais consomem a massa *wafer* rapidamente.

No que tange às indústrias alimentícias, além da preocupação em comum com outros setores industriais em relação ao volume e às perdas operacionais, também há uma grande atenção ao *food safety*. Segundo a Organização Mundial de Saúde, *food safety* consiste em proteger os produtos alimentícios de contaminação por agentes passíveis de ocorrência na cadeia de produção. Alimentos contaminados com bactérias, vírus, parasitas ou substâncias químicas nocivas ao ser humano podem causar mais de 200 doenças distintas, desde diarreia até câncer. Devido à esta preocupação com *food safety*, não é vantajoso manter um *buffer* de massa *wafer* com grande capacidade, pois quanto mais tempo a massa ficar parada, maior será o risco dela não estar apropriada para a produção.

O sistema de envio de massa para o forno que será abordado no estudo de caso apresentado neste trabalho é composto por válvulas *Manifold*, que são responsáveis pela realização de um controle apurado do fluxo de fluidos, garantindo que o sistema opere em níveis de pressão controlados e atenda aos requisitos de segurança e qualidade. Se não há um plano de manutenção preventiva bem desenhado para esse conjunto de válvulas, o sistema produtivo fica sujeito às falhas. Uma parada na linha de produção, devido à uma falha no sistema de envio de massa, pode causar impactos significativos em termos de custo e de qualidade.

## 4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

É importante descrever o problema e detalhar melhor suas nuances. Assim, este tópico tende a explicitar mais informações sobre o assunto estudado.

### 4.2.1 Aspectos operacionais

As válvulas *Manifold* são usadas em muitas indústrias alimentícias para conectar duas ou mais válvulas juntas em um sistema de transferência de fluidos. Normalmente, elas são usadas para controlar a operação de vários fluxos de fluidos conforme eles se movem por uma

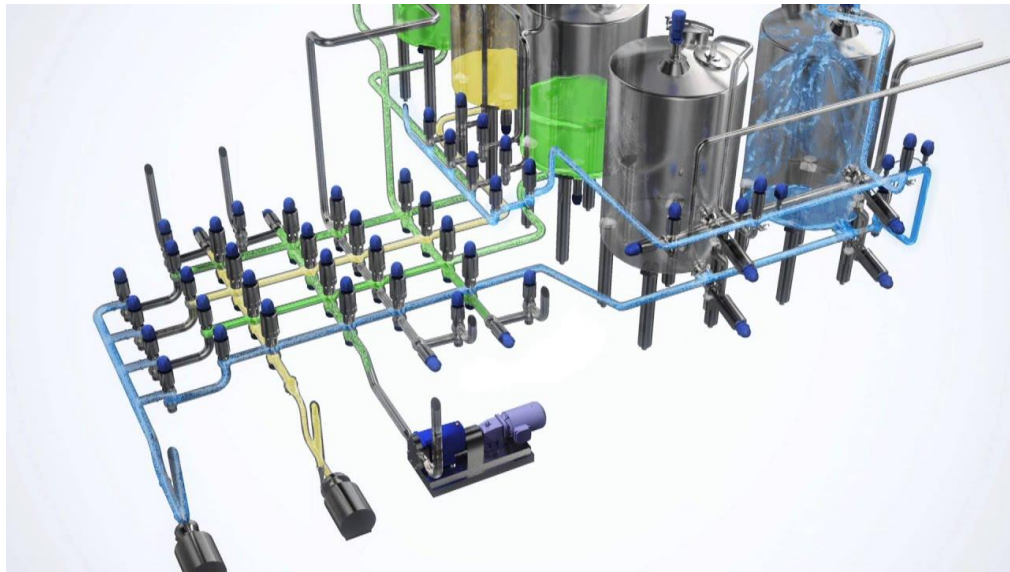
planta: por exemplo, produto em uma tubulação e material líquido de limpeza em outra. Nesse sentido, essas válvulas atuam essencialmente como guardas de trânsito em uma rede de linhas de processo, visto que elas permitem que algumas válvulas permaneçam abertas enquanto outras são fechadas ou parcialmente fechadas para restringir os fluxos.

Dessa forma, as principais vantagens das válvulas *Manifold* são:

- a) Proporcionar operações de sistemas mais eficientes em comparação à abertura e ao fechamento de cada válvula de forma independente;
- b) Ter um sistema semiautomatizado, que pode ser controlado por um computador central;
- c) Reduzir consumo de energia e custos associados por meio de uma operação mais eficiente;
- d) Reduzir tempo de inatividade ao realizar limpeza das tubulações de forma semiautomatizada;
- e) Permitir caminhos de fluidos mais curtos, o que reduz a probabilidade de quedas de pressão e flutuações de calor;
- f) Requerer menos conexões entre tubos, o que reduz as chances de vazamentos;
- g) Reduzir custos de instalação devido ao layout mais simples e compacto oferecido.

Em uma indústria de *chocowafer*, na etapa de preparação de massa, a massa *wafer* líquida é preparada no *mixer* e, em seguida, passa pelo bloco de válvulas *Manifold* até chegar à linha, que é uma tubulação que leva ao tanque de abastecimento. Esse tanque funciona como um *buffer* que vai aumentando ou diminuindo de acordo com a necessidade de consumo dos fornos. A limpeza de um bloco *Manifold* ocorre por meio de uma unidade de *CIP* (*Cleaning In Place*), que possui um sistema de tanques, tubulações e válvulas controlado por um software específico que se encarrega de lavar e higienizar automaticamente todo o sistema de produção e envio de massa *wafer*. Nesta higienização, é necessário circular com altas concentrações de químicos. Logo, há uma tendência de que, ao passar do tempo, o conjunto de reparos internos das válvulas *Manifold* se desgastem e gerem falhas de acionamento durante os comandos de modulação. Vale destacar que o termo “reparo” está sendo usado neste texto para se referir aos componentes mecânicos internos das válvulas *Manifold*. Por conseguinte, periodicamente, o planejador de manutenção de uma indústria precisa estabelecer um plano de substituição de componentes dessas válvulas antes que elas falhem. Segue na Figura 6 uma representação de um sistema produtivo de produção e envio de massa *wafer* líquida.

Figura 6 – Representação de um sistema de produção e envio de massa wafer



Fonte: Laval (2020).

#### 4.2.2 Aspectos de falha

Conforme ilustrado na Figura 7, as válvulas *Manifold* consistem em um único bloco ao qual várias válvulas são conectadas. Cada bloco é feito sob medida para atender a um determinado projeto de sistema e tipo de processo e de válvula determinado pelo cliente.

Figura 7 – Válvulas *Manifold*



Fonte: Valve Manifolds (SPX FLOW Inc., Carolina do Norte, EUA).

No sistema em estudo, as válvulas *Manifold* são de duplo assento, ultra higiênicas, à prova de mistura e com limpeza independente dos assentos, de forma a atender às demandas desafiadoras do processamento higiênico. Este tipo de válvula é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Válvula De Duplo Assento



Fonte: DA3+ Series - Double Seat Mix Proof Valves (SPX FLOW Inc., Carolina do Norte, EUA).

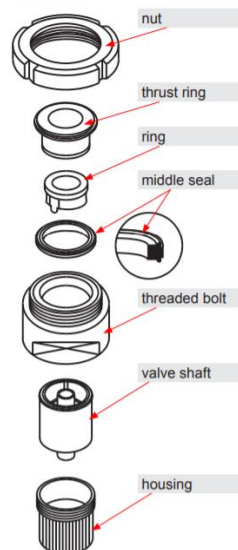
Uma válvula do bloco *Manifold* se encontra em estado de falha quando não é possível abri-la ou fechá-la para liberar ou bloquear algum fluxo. Este estado de falha ocorre quando um ou mais componentes da válvula entram em falha. No sistema em estudo, o modo de falha predominante é o mecânico, que seria a falha de acionamento devido ao desgaste mecânico dos componentes internos do *kit* de reparo da válvula, essencialmente vedações.

Na prática, o que intensifica esse desgaste mecânico é a realização do *CIP*. Antes da falha mecânica, o equipamento apresenta um estado defeituoso, caracterizado por uma dificuldade no acionamento ou modulação, que emite um alerta na IHM (Interface Homem-Máquina). Entretanto, nem todos os alertas de dificuldade no acionamento ou modulação são oriundos de algum defeito na válvula, ou seja, o agente causador desse alerta só pode ser identificado através da desmontagem da válvula.

### 4.2.3 Manutenção

Na indústria alimentícia em questão há um plano de manutenção preventiva anual. Essa manutenção consiste na remoção da válvula da tubulação, o que inclui a remoção da vedação do eixo inferior. Após a retirada da válvula, esse equipamento é levado para uma estação de trabalho, onde ele será desmontado para que possa ser realizada a lubrificação das vedações. Por fim, há a remontagem e inserção da válvula na tubulação. Vale ressaltar que pode haver troca dos componentes caso seja identificado algum ponto fora do padrão. Um exemplo da desmontagem da válvula é ilustrado pela Figura 9.

Figura 9 – Selo Do Meio Do Eixo Da Válvula Inferior Desmontado



Fonte: Baumbach, 2017.

Como a manutenção preventiva requer que a válvula seja retirada da tubulação, é necessário garantir que não haja fluxo no trecho da válvula, visto que não há uma forma de isolar o fluxo da válvula em questão das outras. Isto significa que mais de uma válvula não funcionará no momento, o que pode gerar um impacto de custo de linha parada. Outro ponto é que não há muito espaço entre as válvulas. Logo, a remoção da válvula costuma exigir grande habilidade do técnico, tanto é que o manual indica a necessidade de o técnico ter formação em válvulas. Ademais, essa remoção costuma ser demorada. Dessa forma, é uma prática comum alocar essa manutenção preventiva anual em momentos de paradas planejadas de longa duração das linhas de produção. Esse mesmo procedimento de manutenção ocorre para o caso da realização de uma inspeção de uma válvula, o que justifica o porquê de o time de



manutenção da indústria em questão não conseguir adotar uma política de inspeções periódicas.

Quando há uma falha, a válvula não é trocada, apenas o seu *kit* de reparos, devido ao seu alto custo. Vale salientar que nas manutenções corretivas e preventivas, normalmente, todos os reparos são trocados, ainda que nem todos os componentes estejam em péssimo estado. Quando isso ocorre, é possível retornar o equipamento a um estado quase tão bom quanto novo.

A qualidade do serviço de manutenção pode influenciar no desempenho da válvula e gerar uma falha, tanto é que já houve um caso em que o reparo foi montado ao contrário, o que impediu a válvula de modular e acarretou um vazamento de massa, que parou a linha de produção. Se essa válvula tivesse falhado por causa de algum reparo responsável pela vedação durante o *CIP*, ou seja, se a válvula ao invés de fechada, estivesse aberta, poderia haver passagem de químico, o que geraria uma contaminação química na massa *wafer*. Todavia, esse é um risco baixo, e pode ser reduzido a níveis desprezíveis com a prática de supervisão do serviço de manutenção.

#### 4.3 MODELO PROPOSTO

Neste tópico a modelagem matemática é desenvolvida para este trabalho.

##### 4.3.1 Estrutura da política de manutenção

A partir da análise das características do sistema em estudo, bem como da descrição de como o sistema se deteriora ao longo do tempo e as consequências disso, uma alternativa para minimizar os custos e aumentar a confiabilidade do sistema é adotar uma política de manutenção oportuna em conjunto com uma política de manutenção em bloco em tempo calendário. Considerando isso, e também a importância de uma política simples e fácil de ser executada, propõe-se uma política semelhante à adotada por Ding & Tian (2011) para manutenção perfeita, no qual quando há a ocorrência de uma falha e, conseqüentemente, uma manutenção corretiva, aproveita-se a oportunidade para executar uma manutenção preventiva nos equipamentos que atingem um dado critério.

As válvulas *Manifold* podem ser classificadas em dois tipos: crítica, cuja falha implica em uma parada no sistema; e redundante, cuja falha não implica em uma parada no sistema. Na política de manutenção proposta neste estudo, os componentes das válvulas são

substituídos em bloco a cada intervalo de tempo  $T$ . Entretanto, essa substituição só irá ocorrer se as válvulas críticas para o sistema tiverem uma idade maior que  $X_1$  e as válvulas redundantes para o sistema tiverem uma idade maior que  $X_2$ . Como as válvulas estão sujeitas à falha antes da substituição em bloco, se uma válvula crítica falhar, haverá uma manutenção corretiva nela, e isso poderá gerar uma oportunidade para as demais da seguinte forma: se a idade de uma válvula crítica for maior que  $X_3$ , deverá ser realizada uma manutenção preventiva. Do mesmo modo, se a idade de uma válvula redundante for maior que  $X_4$ , também deverá ser realizada uma manutenção preventiva. Por sua vez, se uma válvula redundante falhar, a confiabilidade do sistema como um todo deverá ser medida de tal forma, que se essa confiabilidade estiver abaixo de um limiar  $R_1$ , haverá uma manutenção corretiva nessa válvula redundante que falhou. Bem como, será seguida a mesma regra para a manutenção oportuna mencionada anteriormente.

Desse modo, a função objetivo consiste em encontrar os valores das variáveis de decisão  $T$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  e  $R_1$  que minimizem o custo esperado por unidade de tempo no longo prazo,  $C_E$ . A Figura 3.5 ilustra a estrutura proposta para o estudo da política de manutenção.

Figura 10 -Estrutura proposta para o modelo de manutenção



Fonte: A Autora (2020).

Apesar de haver vários reparos que podem gerar um modo de falha mecânico será considerado que apenas um reparo pode causar uma falha mecânica. É evidente que para a renovação do sistema como um todo é necessária a manutenção de outros componentes. Porém, tal simplificação é necessária e suficiente de modo a viabilizar o desenvolvimento do modelo matemático.

Além disso, mesmo que as válvulas *Manifold* possuam outros modos de falha, apenas o modo de falha mecânico é considerado para a modelagem por ser o mais crítico. Mesmo que seja simplificado em alguns aspectos, o modelo continua sendo uma ferramenta muito útil para obter orientações para a definição da política de manutenção mais adequada (AVEN & JENSEN, 1999).

Vale ressaltar que a validação da utilização da política de manutenção desenvolvida neste estudo é feita por meio da comparação com as seguintes políticas:

- a) Manutenção em bloco e manutenção corretiva sempre que o sistema falhar;
- b) Manutenção em bloco e manutenção corretiva sempre que uma válvula falhar, independentemente de ser crítica ou redundante.

#### 4.3.2 Notação comum

A notação apresenta na Tabela 1 é utilizada ao longo deste trabalho.

Tabela 1 – Notação Utilizada No Desenvolvimento Do Trabalho

<i>Variáveis de decisão</i>	
$X_1$	Limite de idade para válvulas críticas na manutenção em bloco
$X_2$	Limite de idade para válvulas redundantes na manutenção em bloco
$X_3$	Limite de idade para válvulas críticas na manutenção oportuna
$X_4$	Limite de idade para válvulas redundantes na manutenção oportuna
$R_1$	Limite de confiabilidade para válvulas redundantes na manutenção oportuna
$T$	Tempo calendário para manutenção em bloco
<i>Parâmetros do modelo</i>	
$N$	Quantidade de válvulas <i>Manifold</i> no sistema
$v$	Quantidade de válvulas que sofreram manutenção
$M_1$	Mixer 1
$L_1$	Linha 1
$Q$	Estação de Químicos
$i = A, \dots, G$	Válvulas <i>Manifold</i>
$R_i - \text{onde } i = 1, \dots, 6$	Confiabilidade do corte mínimo $i$
$R_i - \text{onde } i = A, \dots, G$	Confiabilidade da válvula <i>Manifold</i> $i$
$R_s$	Confiabilidade do sistema de válvulas <i>Manifold</i>
$c_{man}$	Custo de manutenção de uma válvula

$c_{sp}$	Custo do <i>setup</i> preventivo
$c_{sc}$	Custo do <i>setup</i> corretivo
$c_{lp}$	Custo de linha parada
$c_{mp}$	Custo da manutenção preventiva
$c_{mc}$	Custo da manutenção corretiva
$c_{mt}$	Custo da manutenção total
$C_E$	Custo de manutenção esperado por unidade de tempo
$t_{man}$	Tempo de manutenção de uma válvula
$t_{sc}$	Tempo de <i>setup</i> corretivo
$t_{mp}$	Tempo de manutenção preventiva
$t_{mc}$	Tempo de manutenção corretiva
$t_{mt}$	Tempo de manutenção total
$t_f$	Tempo de falha de uma válvula <i>Manifold</i>
$t_a$	Tempo de falha acumulado de uma válvula <i>Manifold</i>
$t_s$	Tempo de simulação
$x$	Idade de uma válvula <i>Manifold</i>
$n_f$	Número de iterações da simulação Monte Carlo
$\theta$	Parâmetro de escala da distribuição <i>Weibull</i>
$\gamma$	Parâmetro de forma da distribuição <i>Weibull</i>

FONTE: A AUTORA (2020).

#### 4.3.3 Pressupostos do modelo

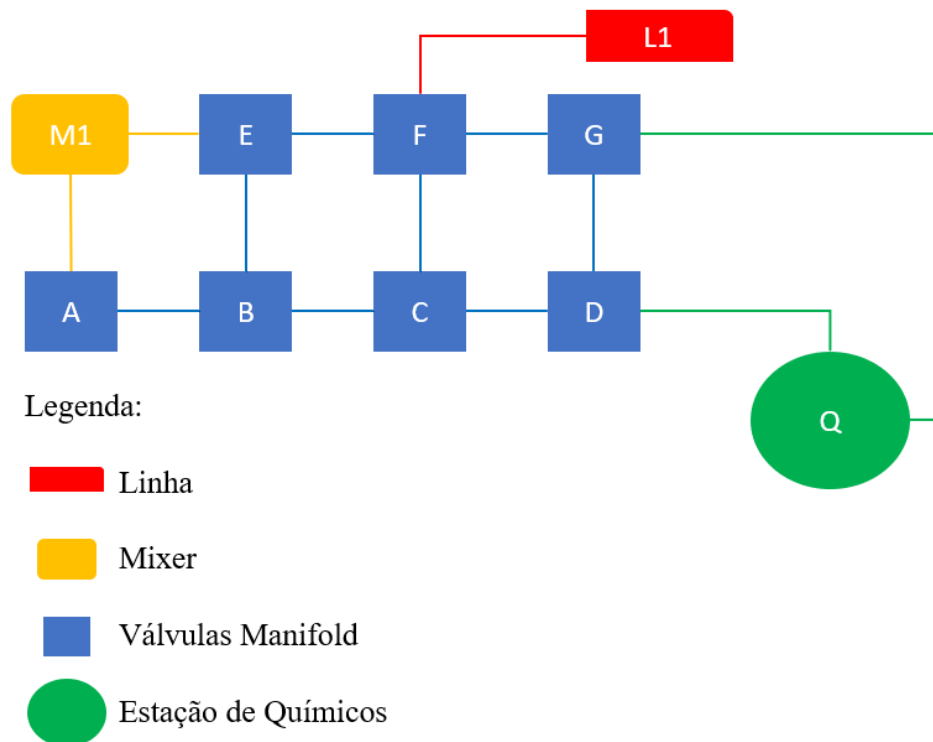
O modelo apresentado foi desenvolvido a partir dos seguintes pressupostos:

- O sistema é complexo e apresenta N válvulas *Manifold* idênticas e independentes;
- As válvulas apresentam dois estados possíveis: operacional ou falho;
- Os componentes das válvulas são não reparáveis e renovados através das suas substituições;
- A manutenção é perfeita;
- A substituição do reparo pode ser feita de forma preventiva, corretiva ou oportuna, o que ocorrer primeiro;
- A distribuição de probabilidade do tempo até a falha das válvulas é conhecida;
- Não há erro de julgamento com relação à identificação do estado de falha;
- O tempo e o custo das ações de manutenção são constantes, conhecidos e iguais para cada válvula;
- Para que seja feita a manutenção em uma ou mais válvulas, o sistema de válvulas *Manifold* deve estar não operacional, portanto, o tempo para manutenção incorre em *downtime*. Durante esse período de *downtime*, não há envelhecimento das válvulas que estão em manutenção;

- j) A manutenção oportuna das válvulas ocorre logo em seguida à manutenção corretiva da válvula que falhou, dessa forma, o tempo total de manutenção é igual à soma dos tempos de manutenção corretiva e preventiva de cada válvula;
- k) A manutenção preventiva das válvulas na manutenção em bloco ocorre de forma consecutiva, dessa forma, o tempo total de manutenção é igual à soma dos tempos de manutenção preventiva de cada válvula;
- l) Os casos em que a próxima falha ocorrer enquanto uma ou mais válvulas estiverem em manutenção não serão considerados;
- m) Se no momento da realização da manutenção em bloco uma ou mais válvulas estiverem em manutenção, seja preventiva ou corretiva, a manutenção em bloco só ocorrerá após o término dessa manutenção;
- n) Se uma válvula redundante falhar e a confiabilidade do sistema não for menor que o limiar estabelecido, não haverá manutenção corretiva. Entretanto se uma ou mais válvulas redundantes falharem em seguida, e isso gerar uma parada no sistema, haverá manutenção corretiva na última válvula que falhou.

#### 4.3.4 Desenvolvimento do modelo

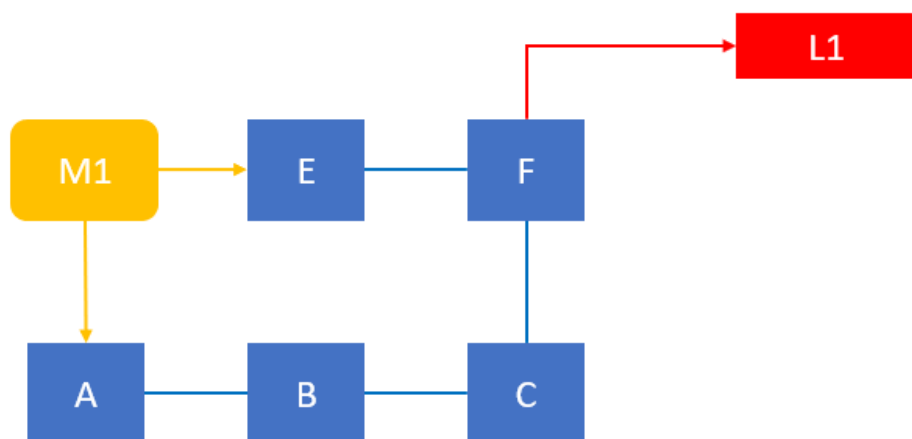
O modelo foi desenvolvido a partir da enumeração dos subsistemas presentes no sistema de válvulas *Manifold* ilustrado na Figura 11. Há dois tipos de subsistemas: o de envio de massa *wafer* líquida e o de limpeza *CIP* dos componentes do sistema. Esse sistema só está operacional se todos os seus subsistemas estiverem operacionais, ademais, para a obtenção da sua confiabilidade é utilizado o método dos cortes mínimos. Para cada subsistema é apresentado o conjunto de cortes mínimos e após o detalhamento desses conjuntos, são desconsiderados os cortes mínimos que se repetem e em seguida, é feito o cálculo da confiabilidade do sistema.

Figura 11- Sistema de válvulas *Manifold*

Fonte: A Autora (2020).

- *Subsistema 1* - ( $M_1 \rightarrow L_1$ ): A massa *wafer* líquida é transferida do *mixer* para a linha que leva ao tanque de abastecimento (Figura 12).

Figura 12 - Subsistema 1

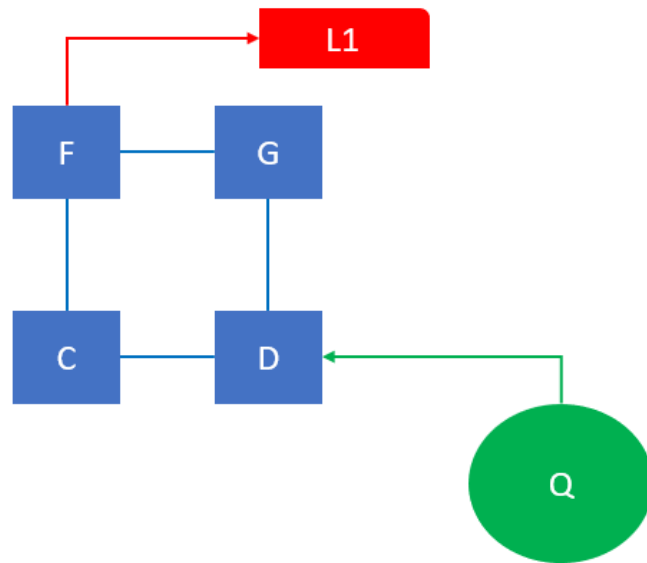


Fonte: A Autora (2020).

Cortes mínimos:  $F$ ,  $AE$ ,  $BE$  e  $CE$ .

- *Subsistema 2* - ( $Q \rightarrow L_1$ ): Realização da ida do *CIP* da linha (Figura 13).

Figura 13 – Subsistema 2

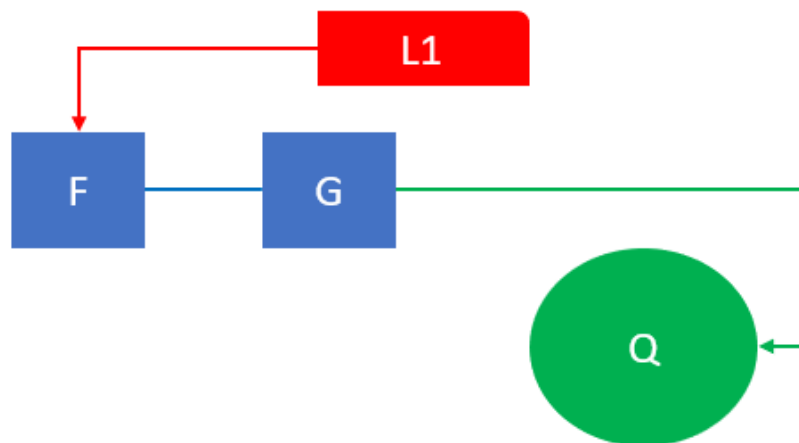


Fonte: A Autora (2020).

Cortes mínimos:  $D$ ,  $F$  e  $CG$ .

- *Subsistema 3* - ( $L_1 \rightarrow Q$ ): Realização do retorno do *CIP* da linha (Figura 14).

Figura 14 – Subsistema 3

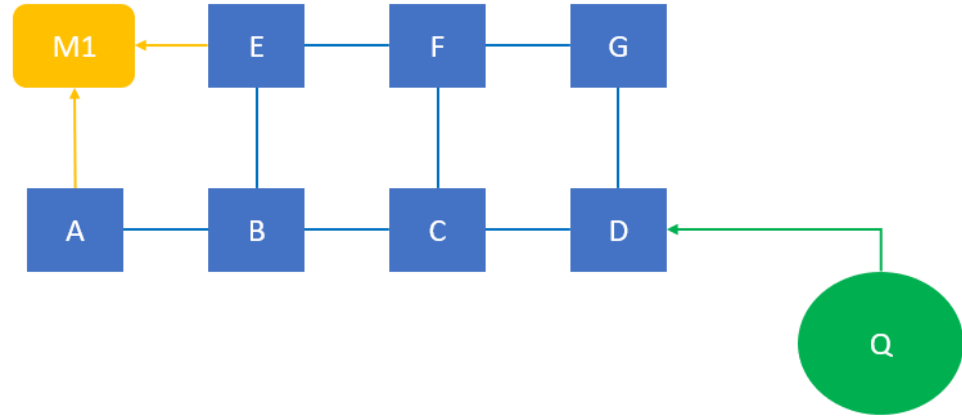


Fonte: A Autora (2020).

Cortes mínimos:  $F$  e  $G$ .

- *Subsistema 4* - ( $Q \rightarrow M_1$ ): Realização da ida do *CIP* do *mixer* (Figura 15).

Figura 15 – Subsistema 4

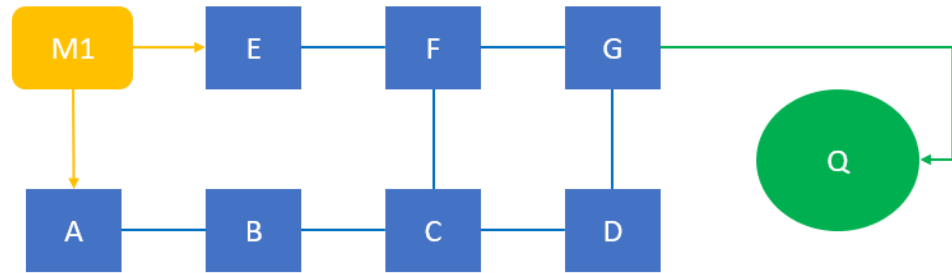


Fonte: A Autora (2020).

Cortes mínimos:  $D$ ,  $AE$ ,  $BE$ ,  $BF$ ,  $CE$ ,  $CF$  e  $CG$ .

- *Subsistema 5* - ( $M_1 \rightarrow Q$ ): Realização do retorno do *CIP* do *mixer* (Figura 16).

Figura 16 – Subsistema 5



Fonte: A Autora (2020).

Cortes mínimos:  $G$ ,  $AE$ ,  $AF$ ,  $BE$ ,  $BF$ ,  $CE$ ,  $CF$ ,  $DE$  e  $DF$ .

Dessa forma, os cortes mínimos do sistema são:  $D$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $AE$ ,  $BE$  e  $CE$  e suas respectivas confiabilidades são definidas pelas equações (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6):

$$R_1 = R_D \quad (4.1)$$

$$R_2 = R_F \quad (4.2)$$

$$R_3 = R_G \quad (4.3)$$

$$R_4 = R_A + R_E - (R_A \times R_E) \quad (4.4)$$

$$R_5 = R_B + R_E - (R_B \times R_E) \quad (4.5)$$

$$R_6 = R_C + R_E - (R_C \times R_E) \quad (4.6)$$

A definição dos cortes mínimos acima implica que as válvulas  $D$ ,  $F$  e  $G$  são críticas para o sistema, visto que se falharem, o sistema falha, enquanto que as válvulas  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $E$ , são redundantes, visto que se falharem individualmente, o sistema não falha.



Considerando que o sistema só está operacional se todos os cortes mínimos estiverem operacionais, é possível definir a confiabilidade do sistema de acordo com a equação (4.7).

$$R_S = R_D \times R_F \times R_G \times (R_A + R_E - (R_A \times R_E)) \times (R_B + R_E - (R_B \times R_E)) \times (R_C + R_E - (R_C \times R_E)) \quad (4.7)$$

A manutenção desse sistema pode ser preventiva ou corretiva. Em ambos os casos, há um custo,  $c_{man}$ , e um tempo,  $t_{man}$ , associados à troca dos componentes de uma válvula, entretanto, dependendo do tipo de manutenção haverá um custo e um tempo de *setup* distintos. Isso ocorre porque quando a manutenção é corretiva ao invés de preventiva, há um impacto no tempo de preparação da mão-de-obra que realizará a manutenção, o que também é refletido no custo. Outro ponto é que a longo prazo para que a manutenção corretiva ocorra no menor tempo possível, muitas vezes, não havendo os componentes internos necessários para a manutenção, são realizados pedidos emergenciais, o que implica em um aumento do custo da manutenção corretiva.

Portanto, sendo  $v$  o número de válvulas que sofreram manutenção, é possível definir o custo e o tempo de manutenção preventiva de acordo com as equações (4.8) e (4.9) respectivamente. Vale destacar que não é considerado um tempo de *setup* preventivo, visto que o impacto do tempo de preparação do sistema neste caso é irrisório. Por sua vez, é possível definir o custo e o tempo de manutenção corretiva de acordo com as equações (4.10) e (4.11) respectivamente.

$$c_{mp} = (v * c_{man}) + c_{sp} \quad (4.8)$$

$$t_{mp} = (v * t_{man}) \quad (4.9)$$

$$c_{mc} = (v * c_{man}) + c_{sc} \quad (4.10)$$

$$t_{mc} = (v * t_{man}) + t_{sc} \quad (4.11)$$

Por fim, o custo e o tempo de manutenção total,  $c_{mt}$  e  $t_{mt}$ , são iguais à soma dos custos e tempos de manutenção preventiva e corretiva. Vale ressaltar que como o sistema fica não operacional durante a manutenção é preciso considerar no  $c_{mt}$  o impacto de custo de linha parada,  $c_{lp}$ . É possível ilustrar os cálculos de  $c_{mt}$  e  $t_{mt}$ , respectivamente, de acordo com as equações (4.12) e (4.13).

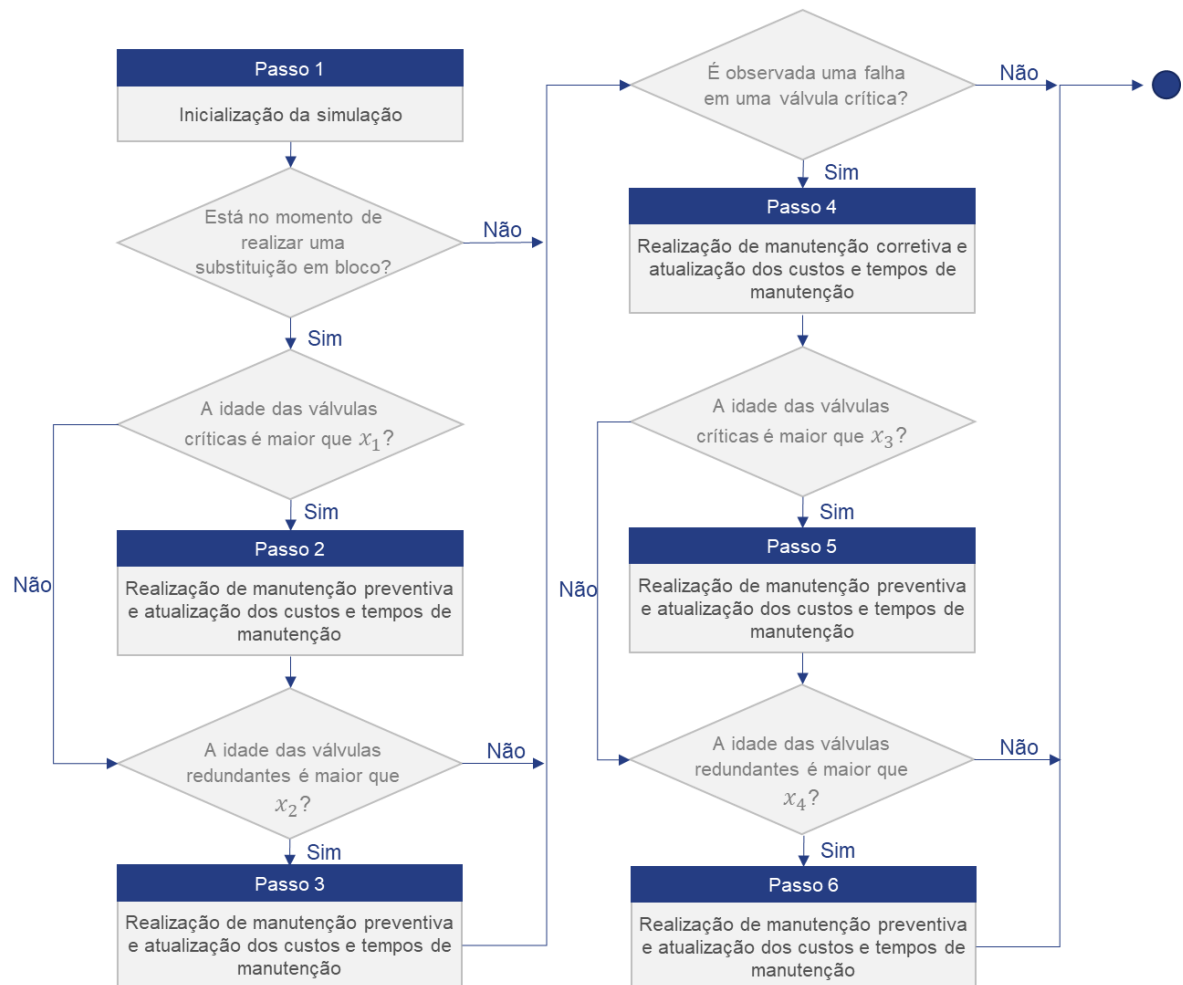
$$c_{mt} = c_{mp} + c_{mc} + (c_{lp} \times t_{mt}) \quad (4.12)$$

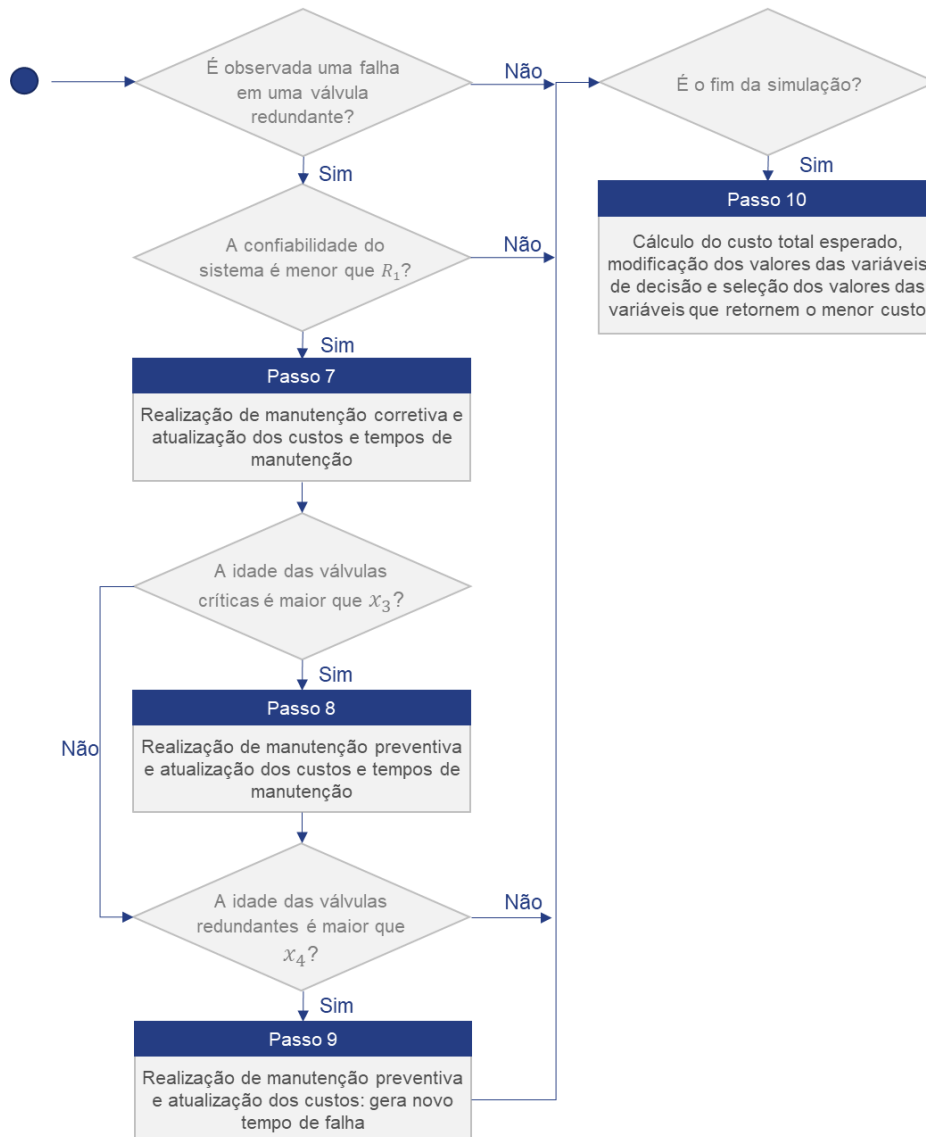
$$t_{mt} = t_{mp} + t_{mc} \quad (4.13)$$

### 4.3.5 Método de solução

Devido à complexidade da otimização do sistema em estudo, foi desenvolvido um método de simulação para calcular o  $C_E$  para a política de manutenção proposta. Supondo que as distribuições de probabilidade de falha de cada válvula são conhecidas e que as idades das válvulas podem ser obtidas, o processo de simulação é descrito pelo fluxograma da Figura 17.

Figura 17 – Simulação para determinação do custo da política de manutenção





Fonte: A Autora (2020).

- a) Passo 1 - Inicialização da simulação: É especificado o número máximo de iterações,  $n_f$ , bem como o número de válvulas Manifold,  $N$ , presentes no sistema. É definido um valor inicial para as variáveis de decisão,  $T$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  e  $R_1$ , ademais, é especificado os valores dos custos e tempos de manutenção,  $c_{man}$ ,  $c_{sp}$ ,  $c_{sc}$ ,  $c_{lp}$ ,  $t_{man}$  e  $t_{sc}$ . O custo e o tempo da manutenção total,  $c_{mt}$  e  $t_{mt}$  são inicialmente iguais à zero e são atualizados ao longo do processo de simulação. Os parâmetros da distribuição Weibull,  $\theta$  e  $\gamma$ , para cada uma das válvulas são dados, e consequentemente, são gerados os primeiros tempos de falha,  $t_f$ . O tempo de falha inicial de cada válvula é atribuído ao tempo de falha acumulativo,  $t_a$ , que vai aumentando ao longo do tempo de simulação,  $t_s$ . Por fim, as idades das válvulas,  $x$ , são inicialmente iguais à zero.

- b) Passo 2 - Manutenção oportuna: O  $t_s$  é igualado ao menor dos tempos  $t_a$ , de forma a definir qual válvula irá falhar primeiro. Se esse  $t_s$  ocorrer antes do tempo da manutenção em bloco,  $T$ , deverá ser analisada a possibilidade de realização de manutenção oportuna. Caso a válvula que falhar seja crítica, é feita uma manutenção corretiva nela, bem como, é feita uma análise das idades das outras válvulas, e se essas idades forem maiores que  $X_3$  para válvulas críticas e maiores que  $X_4$  para válvulas redundantes, é feita uma manutenção preventiva nelas. Por sua vez, caso a válvula que falhar seja redundante, é feita uma análise da confiabilidade do sistema como um todo, e se ela for menor que  $R_1$ , é feita uma manutenção corretiva nessa válvula, ademais, é feita a mesma análise do caso anterior das idades das outras válvulas. Cada manutenção implica numa atualização dos custos e tempos de manutenção, bem como, da idade e do tempo acumulativo de falha de cada válvula.
- c) Passo 3 - Manutenção em bloco: Quando  $t_s$  é igual ao tempo da manutenção em bloco,  $T$ , é feita a análise das idades de cada válvula, e se essas idades forem maiores que  $X_1$  para válvulas críticas e maiores que  $X_2$  para válvulas redundantes, é feita uma manutenção preventiva nelas. Cada manutenção implica numa atualização dos custos e tempos de manutenção, bem como, da idade e do tempo acumulativo de falha de cada válvula.
- d) Passo 4 - Após a realização das manutenções nas válvulas, uma nova iteração é realizada. Se o número de iterações não exceder,  $n_f$ , repetem-se os Passos 2 e 3.
- e) Passo 5 - Cálculo do  $C_E$ : Quando o número máximo de iterações da simulação for atingido, é obtido o valor esperado do custo total de manutenção,  $c_{mt}$ , e o tempo total de simulação,  $t_s$ , para um dado conjunto de variáveis de decisão. A razão  $C_E$  é obtida de acordo com a equação (4.14). A modificação do conjunto de variáveis de decisão é feita por meio de um algoritmo de PSO. O objetivo é encontrar o conjunto de variáveis de decisão que retorne o menor valor de  $C_E$ .

$$C_E = \frac{c_{mt}}{t_s}, t_s > 0 \quad (4.14)$$

#### 4.4 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Neste tópico é discutido a aplicação numérica do modelo proposto.

#### 4.4.1 Especificação dos valores dos parâmetros do modelo

O modelo foi aplicado em um sistema complexo de transferência de massa *wafer* líquida de uma indústria de *chocowafer* composto por sete válvulas *Manifold* idênticas e independentes ( $N = 7$ ). Os parâmetros utilizados nessa aplicação foram estimados com base na experiência do time de manutenção que trabalha na indústria onde o estudo de caso foi realizado.

Conforme explicado anteriormente, só foi considerado o modo de falha mecânico de um único reparo de uma válvula, que é caracterizado pelo desgaste desse componente devido à passagem de químicos, o que implica em uma função de risco crescente. Dessa forma, foi possível modelar esse modo de falha por meio de uma distribuição *Weibull*, que é uma distribuição muito utilizada para padrões de degradação, segundo Alrabghi & Tiwari (2016), com parâmetros estabelecidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros Da Distribuição De Probabilidade De Falha Mecânica

Parâmetro De Escala (Dias)	Parâmetro De Forma
$\theta = 365$	$\gamma = 3$

Fonte: A Autora (2020).

Para a manutenção da válvula, é necessário interromper o fluxo do trecho ligado à válvula em questão, o que gera uma indisponibilidade do sistema, e em seguida, realizar a desmontagem. Independentemente de ser uma manutenção corretiva ou preventiva, o tempo total de manutenção de uma válvula é de cinco horas ( $t_{man} = \frac{5}{24}$ ). Entretanto, quando a manutenção é decorrente de uma falha de um corte mínimo, há um tempo de espera da chegada da equipe de manutenção, o que é caracterizado por um tempo de *setup* corretivo de um dia ( $t_{sc} = 1$ ). Esse tempo de espera é desprezível para o caso de uma manutenção preventiva.

Em relação aos custos de manutenção, foi considerado que o custo da troca do reparo de uma válvula é  $c_{man} = 1$  un. (quantidade não especificada em unidades monetárias). Já o custo da preparação do sistema de forma preventiva é  $c_{sp} = 0.5$  un., enquanto o custo da preparação do sistema de forma corretiva é  $c_{sc} = 2$  un. Por fim, o custo de linha parada é  $c_{lp} = 10$  un.

#### 4.4.2 Aplicação do *PSO*

O método de solução descrito anteriormente foi aplicado no ambiente de desenvolvimento integrado *Spyder* (*Python* 3.8) considerando uma solução inicial estabelecida na Tabela 3 dentro dos limites indicados pelo time de manutenção da indústria em questão. Os valores de  $C_E$  obtidos através de uma simulação de Monte Carlo considerando diferentes valores de iterações,  $n_f$ , são mostrados na Tabela 4.

Tabela 3 – Solução inicial

Variáveis De Decisão	Limite Inferior	Solução Inicial	Limite Superior
$X_1$	0	<b>50</b>	150
$X_2$	0	<b>100</b>	150
$X_3$	0	<b>100</b>	200
$X_4$	0	<b>200</b>	200
$R_1$	0	<b>0,6</b>	1
$T$	200	<b>365</b>	400

Fonte: A Autora (2020).

Tabela 4 – Valores de  $C_E$  para  $n_f$  distintos

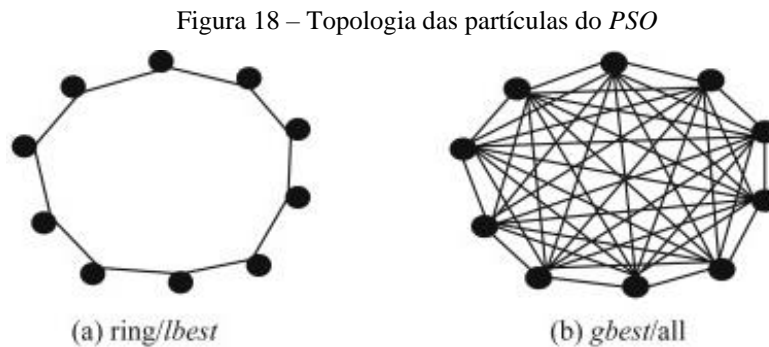
$n_f = 1000$	$n_f = 10000$	$n_f = 100000$
0,156045	0,156262	0,156003
0,157422	0,155961	0,156061
0,156361	0,156033	0,156155
0,155936	0,156164	0,155861
0,156926	0,156153	0,156121
0,155152	0,156347	0,156243
0,155684	0,155677	0,156015
0,155144	0,155529	0,156042
0,156053	0,155833	0,155991
0,156828	0,156159	0,156153

Fonte: A Autora (2020).

Por meio da análise dos resultados obtidos foi observado que ao se utilizar  $n_f = 10000$  é possível obter uma boa convergência da função objetivo  $C_E$ , dessa forma, esse valor de  $n_f$  foi considerado para as análises seguintes.

Para a realização da otimização (ou busca de boas soluções) de  $C_E$  foi escolhido o *PSO* devido a sua rápida convergência e alta acuracidade. Ademais, em comparação com outras heurísticas, o *PSO* possui menos parâmetros a serem ajustados pelo usuário. A biblioteca selecionada para aplicação dessa heurística foi o *PySwarms* que já estabelece um conjunto de variáveis de decisão inicial aleatório.

Foram testados dois tipos de topologias (*optimizer*): *LocalBest* e *GlobalBest*. No *LocalBest*, a vizinhança da partícula é definida por um valor  $k$ , ou seja, cada partícula só recebe informação de outras  $k$  partículas vizinhas, o que implica em uma menor chance dessas partículas caírem em um ótimo local. No *GlobalBest*, por sua vez, cada partícula recebe informação de todas as partículas do enxame, dessa forma, todas as partículas estão conectadas, o que implica em uma convergência mais rápida. Na Figura 18 é possível visualizar uma das topologias mais comuns do *LocalBest*, que é o formato de anel (a), que considera  $k = 2$ , e a topologia do *GlobalBest* (b) (JORDEHI & JASNI, 2013).



Fonte: Adaptado De Lynn; Ali; Suganthan (2018).

Como não há uma regra exata na literatura para a seleção do número de partículas do enxame,  $n_{particles}$ , apenas que quanto maior for o número de variáveis de decisão, maior deve ser o número de partículas, foram feitos alguns testes com valores entre 10 e 60, no qual foi obtido um melhor desempenho com  $n_{particles} = 60$  (JORDEHI & JASNI, 2013).

Em relação ao parâmetro de inércia,  $w$ , foram testados os valores  $w = 0,9$  e  $w = 0,4$  que, segundo Jordehi & Jasni (2013), são amplamente aceitos na literatura. Entre esses dois valores, o que obteve o melhor desempenho foi  $w = 0,65$ . Para os coeficientes de aceleração  $c_1$  e  $c_2$ , foi utilizado como base  $c_1 = c_2 = 2$ , que segundo Ozcan & Mohan (1999), geram resultados aceitáveis para a maioria dos problemas de *PSO*. Entretanto, normalmente, implementando alguma tentativa e erro, é possível obter um comportamento computacional mais eficiente do que o mencionado anteriormente, tanto é que para este estudo foram obtidos

melhores resultados considerando  $c_1 = 1,5$  e  $c_2 = 2,025$ . Vale ressaltar que  $c_2 > c_1$  indica que a experiência social do enxame está sendo mais valorizada (JORDEHI & JASNI, 2013).

Por fim, em relação ao critério de parada do *PSO*, esse é um ponto que depende da necessidade do decisor e do problema em questão (JORDEHI & JASNI, 2013). Neste caso, foi considerado como critério de parada o número de iterações, *iters*, no qual foram feitos testes com *iters* = 100 e *iters* = 200. Foram obtidos resultados com uma convergência satisfatória com *iters* = 200. A Tabela 5 traz os resultados das variáveis de decisão obtidos através da aplicação do *PSO*. Os valores de  $C_E$  foram encontrados através da aplicação no Monte Carlo desses conjuntos de soluções obtidos no *PSO*.

Tabela 5 – Aplicação do *PSO*

<i>optimizer</i>	$n_{particles}$	$w$	$c_1$	$c_2$	<i>iters</i>	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$R_1$	$T$	$C_E$
<b>Global Best</b>	<b>60</b>	<b>0,9</b>	<b>1,5</b>	<b>2,025</b>	<b>200</b>	<b>53</b>	<b>122</b>	<b>111</b>	<b>179</b>	<b>0,14</b>	<b>246</b>	<b>0,1365</b>
<b>Local Best</b>	60	0,9	1,5	2,025	200	94	127	184	101	0,42	251	0,1498
Global Best	<b>10</b>	0,9	1,5	2,025	200	33	6	12	74	0,62	240	0,1862
Global Best	60	<b>0,4</b>	1,5	2,025	200	127	57	85	128	0,56	236	0,1598
Global Best	60	0,9	<b>2</b>	<b>2</b>	200	21	33	20	135	0,30	214	0,1538
Global Best	60	0,9	<b>2</b>	2,025	200	105	109	92	106	0,73	223	0,1611
Global Best	60	0,9	1,5	<b>2</b>	200	72	145	48	101	0,53	280	0,1524
Global Best	60	0,9	1,5	2,025	<b>100</b>	44	103	139	186	0,70	225	0,1535

Fonte: A Autora (2020).

Portanto, o menor  $C_E$  encontrado pelo *PSO* foi 0,1365 *un./dia* através do estabelecimento de limites de idade para a manutenção em bloco de 53 e 122 dias para válvulas críticas e redundantes, respectivamente, e para a manutenção oportuna de 111 e 179 dias para válvulas críticas e redundantes, respectivamente. Nesse caso a manutenção corretiva de uma válvula redundante que falhou só deve ocorrer caso a confiabilidade seja inferior a 0,14, bem como, a manutenção em bloco deve ocorrer a cada 246 dias. Vale ressaltar que por



se tratar de uma heurística não é possível garantir que a solução anterior é a ótima, porém, em geral, o *PSO* é capaz de gerar boas soluções (TAVARES, NEDJAH & MOURELLE, 2015).

#### 4.4.3 Comparação com outras políticas de manutenção e análise de sensibilidade

Foi feita uma comparação da política proposta, Caso Base, com casos particulares, no qual, o Caso 1 representa uma política de manutenção em bloco e manutenção corretiva sempre que o sistema falhar e o Caso 2 representa uma política de manutenção em bloco e manutenção corretiva sempre que uma válvula falhar, independentemente de ser crítica ou redundante. Para aplicar os Casos 1 e 2 no Caso Base foi considerado que não há limite de idade para a realização de manutenção em bloco, logo,  $X_1 = X_2 = 0$ , e não há manutenção oportuna quando houver a falha de alguma válvula, dessa forma,  $X_3 = X_4 = 10000$ , o valor 10000 foi selecionado por ser um número grande nesse contexto. Em relação a confiabilidade, para o Caso 1 ela deve ser um valor pequeno para que não haja manutenção corretiva quando uma válvula redundante falhar, portanto, foi considerado  $R_1 = 0,1$ . Por sua vez, para o Caso 2,  $R_1 = 1$ , já que toda vez que uma válvula redundante falhar, ela deve sofrer manutenção corretiva.

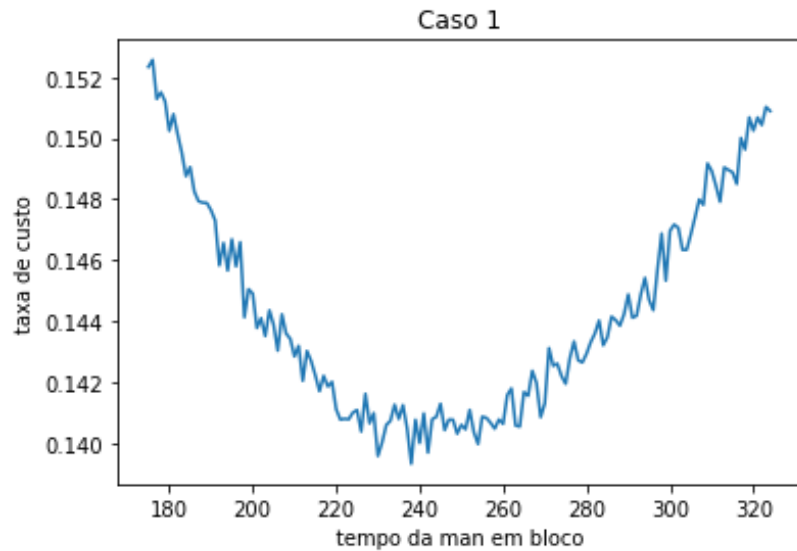
Considerando um intervalo de  $T$  entre 0 e 400, foi encontrado o  $T$  que retorna o menor  $C_E$  para os Casos 1 e 2 e feito uma comparação com a melhor solução obtida pelo *PSO* para o Caso Base conforme ilustrado na Tabela 6, Figura 19 e Figura 20. Vale ressaltar que o intervalo de  $T$  foi reduzido para os Casos 1 e 2 para facilitar a visualização.

Tabela 6 – Comparação entre os casos

Casos	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$R_1$	$T$	$C_E$
<b>Caso Base</b>	53	122	111	179	0,14	246	<b>0,1365</b>
<b>Caso 1</b>	0	0	10000	10000	0,1	238	<b>0,1393</b>
<b>Caso 2</b>	0	0	10000	10000	1	172	<b>0,1862</b>

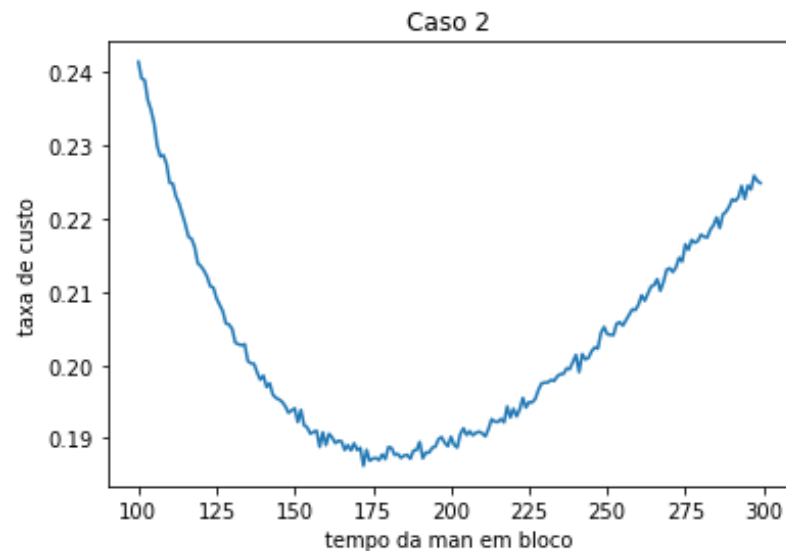
Fonte: A Autora (2020).

Figura 19 - Menor  $C_E$  para o Caso 1



Fonte: A Autora (2020).

Figura 20 - Menor  $C_E$  para o Caso 2



Fonte: A Autora (2020).

A análise dos menores custos esperados por unidade de tempo obtidos para cada caso deixa evidente que o Caso Base é o que obtém o melhor desempenho, entretanto, a sua diferença para o Caso 1 não é tão grande, visto que no Caso 1 nem toda válvula que falha sofre manutenção corretiva, o que acaba reduzindo a quantidade de manutenções realizadas e consequentemente, o custo de manutenção total. Por sua vez, como no Caso 2 toda válvula

que falha sofre manutenção corretiva, a quantidade de manutenções realizadas é maior do que nos outros casos e consequentemente, o custo de manutenção total também é maior, o que explica o porquê desse caso ter um desempenho tão pior do que os outros.

Ademais, as políticas apresentadas na Tabela 6 para o Caso Base, Caso 1 e Caso 2 foram aplicados a cenários em que alguns dos parâmetros de entrada do modelo foram modificados, a fim de ver a sensibilidade de desempenho dessas políticas. Os resultados obtidos para cada caso através da variação dos parâmetros da distribuição *Weibull*,  $\theta$  e  $\gamma$ , e dos custos de manutenção,  $c_{man}$ ,  $c_{sp}$ ,  $c_{sc}$  e  $c_{lp}$  seguem conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise de sensibilidade

	$\theta$	$\gamma$	$c_{man}$	$c_{sp}$	$c_{sc}$	$c_{lp}$	Caso Base $C_E$	Caso 1 $C_E$	Caso 2 $C_E$
1	<b>365</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>0,1365</b>	<b>0,1393</b>	<b>0,1862</b>
2	<b>182,5</b>	3	1	0,5	2	10	0,2895	0,3681	0,4878
3	<b>547,5</b>	3	1	0,5	2	10	0,1053	0,1080	0,1465
4	365	<b>2,5</b>	1	0,5	2	10	0,1486	0,1527	0,2153
5	365	<b>3,5</b>	1	0,5	2	10	0,1289	0,1312	0,1699
6	365	3	<b>0,8</b>	0,5	2	10	0,1315	0,1341	0,1797
7	365	3	<b>1,2</b>	0,5	2	10	0,1436	0,1472	0,1975
8	365	3	1	<b>0,25</b>	2	10	0,1374	0,1390	0,1870
9	365	3	1	<b>0,75</b>	2	10	0,1384	0,1418	0,1889
10	365	3	1	0,5	<b>1,5</b>	10	0,1360	0,1381	0,1854
11	365	3	1	0,5	<b>2,5</b>	10	0,1387	0,1418	0,1898
12	365	3	1	0,5	2	<b>5</b>	0,0890	0,0912	0,1205
13	365	3	1	0,5	2	<b>15</b>	0,1855	0,1899	0,2553

Fonte: A Autora (2020).

Desse modo, é possível perceber que o Caso Base possui o menor custo por unidade de tempo para todas as variações, o que comprova que a política proposta, de fato, é a melhor opção. Em relação a análise de sensibilidade, um dos parâmetros que gerou mais impacto no  $C_E$  foi o  $\theta$ , que impacta na dispersão dos tempos de falha da seguinte forma: quanto maior o  $\theta$ , maior a dispersão dos tempos de falha, logo, há menos manutenções, e consequentemente um menor custo de manutenção total. O aumento em 50% de  $\theta$ , gerou uma redução de

22,86%, 22,47% e 21,32% para o Caso Base, o Caso 1 e o Caso 2, respectivamente. Além disso, outro parâmetro que gerou grande influência foi o custo de linha parada, que ao ser reduzido pela metade, reduziu o custo por unidade de tempo em 34,80%, 34,53% e 35,28% para o Caso Base, o Caso 1 e o Caso 2, respectivamente.

## 5 CONCLUSÃO

Há na literatura, segundo Jonge & Scarf (2020), diversos estudos que associam a manutenção preditiva com manutenção oportuna para sistemas complexos, entretanto, na prática, as empresas, muitas vezes, fazem uso exclusivo de políticas mais simples, como a manutenção em bloco, devido à dificuldade na aplicação de políticas mais robustas. Dessa forma, o presente trabalho demonstra a viabilidade de se aplicar modelos mais eficientes e eficazes em casos práticos.

Inicialmente foi feita uma análise dos mecanismos de deterioração e falha do sistema em estudo, bem como, um levantamento do que já era aplicado em termos de planejamento de manutenção. Vale ressaltar a importância desse estudo prévio, visto que a partir dele foi possível estabelecer que o uso da manutenção preditiva não era aplicável, já que a realização de inspeções é algo muito custoso e demorado nesse caso. A partir dessas informações, foi proposta uma política de manutenção oportuna associada com uma política de manutenção em bloco já existente nesta indústria, e em seguida, foi desenvolvido um modelo para estimar o desempenho dessa política.

A aplicação de uma heurística como o *PSO* no modelo da política proposta gerou boas soluções, que apresentaram um custo por unidade de tempo menor do que os dos casos particulares que só consideram a manutenção em bloco. Ademais, a política proposta também apresentou um melhor desempenho em relação aos casos particulares na análise de sensibilidade dos resultados. Portanto, este trabalho apresenta grandes contribuições para o atingimento do principal objetivo das empresas de otimizar o retorno do capital investido.

### 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Na aplicação numérica, uma questão importante no uso do *PSO* é que diferentes configurações de parâmetros podem levar a comportamentos computacionais significativamente distintos. Apesar da sensibilidade das várias variantes do *PSO* em relação aos seus parâmetros serem diferentes, ele é considerado um algoritmo sensível a parâmetros (JORDEHI & JASNI, 2013). Dessa forma, o principal desafio para se encontrar uma solução aproximadamente ótima reside na seleção dos parâmetros do *PSO* que resultam no melhor comportamento computacional, especialmente quando se considera as restrições impostas pelo problema. Por exemplo, no estudo de caso foram estabelecidos limites para as variáveis de decisão de acordo com a experiência do time de manutenção da indústria em questão.

Dessa forma, por conta dessa limitação, não estão sendo consideradas soluções fora desses limites que poderiam gerar um menor valor para a função objetivo. Essa é uma possibilidade a ser considerada visto que um dos casos particulares apresenta uma solução que está fora dos limites estabelecidos, mas que possui um baixo custo por unidade de tempo em comparação com o caso proposto.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à importância da seleção de parâmetros do *PSO*, é interessante investir mais tempo no teste da influência de cada um desses parâmetros. Ademais, é válido fazer uso de heurísticas para encontrar os parâmetros aproximadamente ótimos do *PSO*, que no caso da biblioteca utilizada no presente trabalho, *PySwarms*, seria o *GridSearch* e o *RandomSearch*. O único ponto dessa estratégia é que aumenta significativamente a complexidade do problema.

No contexto abordado, a utilização da manutenção preditiva não é aplicável, entretanto, há uma oportunidade de se estudar a viabilidade de realização de outros tipos de inspeções nas válvulas *Manifold*, o que permitiria o monitoramento da condição dessas válvulas e a proposição de uma política de manutenção ainda mais robusta.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTI, A.R. **Contribuições para a definição de políticas de manutenção para sistemas de prontidão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. p. 107.
- ALBERTI, A.R.; CAVALCANTE, C.A.V.; SCARF, P.; SILVA, A.L.O. Modelling inspection and replacement quality for a protection system. **Reliability Engineering and System Safety**, 176: 145-153, 2018.
- ALMEIDA, A.T.; DE SOUZA, F.M.C. **Gestão da manutenção na direção da competitividade**. Recife: Universitária, 2001.
- ALMEIDA, A.T.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R.J.P.; ALMEIDA-FILHO, A.T.; GARCEZ, T.V. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**. International Series in Operations Research and Management Science. New York: Springer, 2015.
- ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimization for maintenance systems. **Computers & Industrial Engineering**, 82: 167-182, 2015.
- ALRABGHI, A.; TIWARI, A. A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation. **Reliability Engineering and System Safety**, 154: 160-170, 2016.
- ALYSOUF, I. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. **International Journal of Production Economics**, 105(1): 70-78, 2007.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASEE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- AVEN, T; JENSEN, U. **Stochastic Models in Reliability**. New York: Springer-Verlag New York, 1999.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **Evaluation of measurement data - supplement 1 to the "guide to the expression of uncertainty in measurement" -propagation of distributions using a Monte Carlo method 90**. BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. 101, 2008.
- BAUMBACH, Frank. **APV DELTA DA3+ DN40-100, 1.5"-4"**: DOUBLE SEAT VALVE. Disponível em: <[https://www.spxflow.com/Assets/Pdf/Apv\\_Valves\\_Da3plus\\_Atex\\_Gb.Pdf](https://www.spxflow.com/Assets/Pdf/Apv_Valves_Da3plus_Atex_Gb.Pdf)>. Acesso em 15/12/2020.
- BLAKELEY, F.; BOZKAYA, B.; BUYANG, B.; CAO, B.; HALL, W.; KNOLMAJER, J. Optimizing periodic maintenance operations for Schindler Elevator Corporation. **Journal Interfaces - Special issue: Franz Edelman award for achievement in operations research and the management sciences**, 33(1): 67-79, 2003.

BOGGS, R.E. Plant Maintenance: Changing From a Necessary Evil to a Profit Center. **Tappi Journal**, 80(11): 91-96, 1997.

BRIS, R.; BYCZANSKI, P.; GONO, R.; RUSEK, S. Discrete maintenance optimization of complex multi-component systems. **Reliability Engineering and System Safety**, 168: 80-89, 2017.

CANH VU, H.; DO, P.; FOULADIRAD, M.; GRALL, A. Dynamic opportunistic maintenance planning for multi-component redundant systems with various types of opportunities. **Reliability Engineering and System Safety**, 198, 2020.

CAO, Y.; LIU, S.; FANG, Z.; DONG, W. Modeling Ageing Effects for Multi-State Systems with Multiple Components subject to Competing and Dependent Failure Processes. **Reliability Engineering and System Safety**, 2020.

CARTER, A.D.S. **Mechanical Reliability**. Macmillan Education, 1986.

CASTRO, I.T; BASTEN, R.J.I.; VAN HOUTUM, G. Maintenance cost evaluation for heterogeneous complex systems under continuous monitoring. **Reliability Engineering and System Safety**, 200, 2020.

CAVALCANTE, C.A.V. **Engenharia de Manutenção**: caderno de conceitos, 2018. 28 f. Notas de Aula. Mimeografado.

CAVALCANTE, C.A.V; DE ALMEIDA, A.T. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, 25(2): 279-296, 2005.

CAVALCANTE, C.A.V; DE ALMEIDA, A.T. A Multicriteria Decision Aiding Model Using Promethee III for Preventive Maintenance Planning Under Uncertain Conditions. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 13: 385-397, 2007.

CHAREONSUK, C.; NAGARURA, N.; TABUCANONA, M.T. A Multicriteria Approach to the Selection of Preventive Maintenance Intervals. **International Journal of Production Economics**, 49(1): 55-64, 1997.

CORDER, A.S. **Maintenance management techniques**. McGraw-Hill, 1976.

COX, D.R. **Renewal Theory**. London: Methuen, 1962.

DAY, J.A.; GEORGE, L. Opportunistic Replacement of fusion Power system parts. **Reliability and Maintainability Symposium**, 22: 16-27, 1982.

DEKKER, R.; SMEITINK, E. Opportunity-based block replacement. **European Journal of Operational Research**, 53(1): 46-63, 1991.

DING, F.; TIAN, Z. Opportunistic maintenance optimization for wind turbine systems considering imperfect maintenance actions. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, 18(5): 463-481, 2011.



DING, F.; TIAN, Z. Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds. **Renewable Energy**, 45: 175-182, 2012.

DING, S.H; KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization -literature review and directions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 76: 1263-1283, 2015.

DUNCAN, J.R.M. **Biscuit, Cookie and Cracker Manufacturing -Manuals**. Cambridge (UK): Woodhead Publishing, 1998.

DUNCAN, J.R.M. **Technology of biscuits, crackers and cookies**. Cambridge (UK): CRC Press/Woodhead Publishing, 2000.

FERREIRA, H.L.; CAVALCANTE, C.A.V; DE ALMEIDA, A.T. Estudo para substituição de equipamentos por obsolescência e fim de vida útil. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 17, Minas Gerais, 2003.

FOGLIATTO, F.S.; RIBEIRO, J.L.D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIL, A.C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GLASSER, G.J. Planned Replacement: Some Theory and its Application. **Journal of Quality Technology**, 1(2), 110-119, 1969.

HILLIER, F.S; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

JARDINE, A.K.S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 20(7): 1483-1510, 2006.

JIA, S.; YUAN, Q.; CAI, W.; LI, M.; LI, Z. Energy modeling method of machine-operator system for sustainable machining. **Energy Conversion and Management**, 172: 265-276, 2018.

JIA, S.; YUAN, Q.; LV, J.; LIU, Y.; REN, D.; ZHANG, Z. Therblig-embedded value stream mapping method for lean energy machining. **Energy**, 138: 1081-1098, 2017.

JONGE, B.; SCARF, P.A. A review on maintenance optimization. **European Journal of Operational Research**, 285:805-824, 2020.

JORDEHI, A.R.; JASNI, J. Parameter selection in particle swarm optimization: a survey. **Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence**, 25(4): 527-542, 2013.

JORGENSEN, D.W.; McCALL, J.J. Optimal Replacement Policies for a Ballistic Missile. **Management Science**, 9(3): 358-379, 1963.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle Swarm Optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORK, Perth, 1995. **Proceedings. ICNN'95 - International Conference on Neural Network**, vol. 4, p. 1942-1948, 1995.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LAVAL, Alfa. **Valve Matrix an example of a valve matrix with five tanks**. Youtube. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=dKhkKetKxpQ>>. Acesso em: 26/09/2020.

LEEMIS, L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. New York: Prentice Hall, 1995.

LEVITT, J. **Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance**. Industrial Press Inc, 2003.

LYNN, N.; ALI, M.Z.; SUGANTHAN, P.N. Population topologies for particle swarm optimization and differential evolution. **Swarm and Evolutionary Computation**, 39: 24-35, 2018.

MANN, L. JR. **Maintenance Management**. New York: Lexington Books, 1983.

NAKAGAWA, T. **Maintenance Theory of Reliability**. Springer, 2005.

NEWBROUGH, E.T.; RAMOND, A. **Effective Maintenance Management**. McGraw-Hill, 1967.

O'CONNOR, P.D.T. **Practical Reliability Engineering**. John Wiley & Sons, 1985.

OZCAN, E.; MOHAN, C. Particle swarm optimization: Surfing the waves. In: IEEE International congress of evolutionary computation, Washington DC, 1999. **Proceedings. IEEE Computer Society**, 1999.

PENG, H.; ZHU, Q. Approximate evaluation of average downtime under an integrated approach of opportunistic maintenance for multi-component systems. **Computers & Industrial Engineering**, 109: 335-346, 2017.

PHAM, H.; WANG H. Imperfect maintenance. **European Journal of Operational Research**, 94: 425-438, 1996.

PHAM, H.; WANG H. Optimal ( $\tau$ , T) opportunistic maintenance of a k-out-of-n: G system with imperfect PM and partial failure. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, 47(3): 223-239, 2000.

POPPE, J.; BOUTE, R.N; LAMBRECHT, M.R. A hybrid condition-based maintenance policy for continuously monitored components with two degradation thresholds. **European Journal of Operational Research**, 268(2): 515-532, 2018.

RADNER, R.; JORGENSON, D.W. Opportunistic replacement of a single part in the presence of several monitored parts. **Management Science**, 10(1): 70-84, 1963.

REGATTIERI, A.; GIAZZI, A.; GAMBERI, M.; GAMBERINI, R. An innovative method to optimize the maintenance policies in an aircraft: general framework and case study. **J Air Transp Manage**, 44: 8-20, 2015.

REN, N.; WANG, Y.; GAN, SHUYUAN. A Condition-Based Maintenance Policy (CBM) of Repairable Multi-Component Deteriorating Systems Based on Quality Information. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, 27(1), 2019.

SAMHOURI, M.S. An intelligent opportunistic maintenance (OM) system: A genetic algorithm approach. **IEEE Science and Technology for Humanity**, 60-65, 2009.

SARKER, B.R.; FAIZ, T.I. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy. **Renewable Energy**, 85: 104-113, 2016.

SCARF, P.A.; CAVALCANTE, C.A.V; DWIGHT, R.A; GORDON, P. An age-based inspection and replacement policy for heterogeneous components. **IEEE Transactions on Reliability**, 58: 641-648, 2009.

SHAFIEE, M.; FINKELSTEIN, M.; BÉRENGUER, C. An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks. **Reliability Engineering and System Safety**, 142: 463-471, 2015.

SMITH, J.Q. **Decision Analysis: A Bayesian Approach**. Chapman and Hall, 1988.

SODERHOLM, P.; HOLMGREN, M.; KLESJO, B. A process view of maintenance and its stakeholders. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 13(1): 19-32, 2007.

TAVARES, Y.M.; NEDJAH, N.; MOURELLE, L.M. Utilização de Otimização por Enxame de Partículas e Algoritmos Genéticos em Rastreamento de Padrões. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL, 12., Curitiba, 2015. **Proceedings**. CBIC, 2015.

TERBORGH, G. **Dynamic Replacement Policy**. New York: McGraw-Hill, 1949.

VAN DER WEIDE, J. A. M.; PANDEY, M. D.; VAN NOORTWIJK, J. M. Discounted cost model for condition-based maintenance optimization. **Reliability Engineering & System Safety**, 95: 236-246, 2010.

VAN HORENBEEK, A.; PINTELON, L; MUCHIRI, P. Maintenance optimization models and criteria. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, 1(3): 189-200, 2010.

VU, H.C.; DO, P.; BARROS, A.; BÉRENGUER, C. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies. **IMA Journal of Management Mathematics**, 26(2): 145-170, 2015.

- WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. **European Journal of Operational Research**, 139(3): 469-489, 2002.
- WANG, W.; SCARF, P.A.; SMITH, M. On the application of a model of condition-based maintenance. **Journal of the Operational Research Society**, 51(11): 1218-1227, 2000.
- WILDEMAN, R.E.; DEKKER, R.; SMIT, A.C.J.M. A dynamic policy for grouping maintenance activities. **European Journal of Operational Research**, 99(3): 530-551, 1997.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/food-safety/>. Acesso em: 1 nov. 2019.
- YOUSEFI, N.; COIT, D.W.; SONG, S.; FENG, Q. Optimization of on-condition thresholds for a system of degrading components with competing dependent failure processes. **Reliability Engineering and System Safety**, 192, 2019.
- YUAN, Q.; JIN, Z.; JIA, S.; LIU, Q. An improved opportunity maintenance model of complex system. **Advances in Mechanical Engineering**, 11(4): 1-19, 2019.
- ZHAO, X.Y.; LI, W.H.; SUN, P. **System modeling and simulation**. Beijing: National Industry Press, 2015.
- ZHU, Q.; PENG, H.; TIMMERMANS, B.; VAN HOUTUM, G. A condition-based maintenance model for a single component in a system with scheduled and unscheduled downs. **International Journal of Production Economics**, 193: 365-380, 2017.
- ZHU, Z.; XIANG, Y. Condition-based maintenance for multicomponent systems: Modeling, structural properties, and algorithms. **IIE Transactions**, 2020.