

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

LUCAS FREDERICO ALVES RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE MANUTENÇÃO SELETIVA
INTEGRADOS A DECISÕES ORÇAMENTÁRIAS E ESTRATÉGICAS**

Recife

2021

LUCAS FREDERICO ALVES RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE MANUTENÇÃO SELETIVA
INTEGRADOS A DECISÕES ORÇAMENTÁRIAS E ESTRATÉGICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Recife

2021

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

R484d Ribeiro, Lucas Frederico Alves
Desenvolvimento de modelos de manutenção seletiva integrados a decisões orçamentárias e estratégicas / Lucas Frederico Alves Ribeiro. - 2021.
71 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2021.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia de Produção. 2. Integração. 3. Modelos. 4. Manutenção. 5. Planejamento. 6. Algoritmo. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-175

LUCAS FREDERICO ALVES RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE MANUTENÇÃO SELETIVA
INTEGRADOS A DECISÕES ORÇAMENTÁRIAS E ESTRATÉGICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovada em: 22/12/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Leandro Chaves Rêgo (Examinador Interno)
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Itajubá

AGRADECIMENTOS

A Deus, Senhor do meu destino, âncora da minha alma.

Aos meus pais, Luiz Santana e Marina Ribeiro, meu porto seguro na minha trajetória.

Ao meu irmão, Luiz Felipe, que me acompanha nessa caminhada.

A Dayane Cristina, por me inspirar força e coragem.

Ao professor Cristiano Cavalcante, por ter sido farol nesta jornada e por ter me animado em momentos de aflição.

Ao Augusto César, pelo pronto auxílio, e aos demais amigos e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, especialmente aos companheiros do RANDOM, pela fraternidade.

Aos queridos irmãos, John David e Leonardo Gleygson, pela hospitalidade, pelas orações em meu favor e pela amizade sincera.

Aos irmãos da IEBV, pelo amor.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior (CAPES) e à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), por financiarem minha pesquisa.

“Ever Tried. Ever Failed. No Matter. Try Again. Fail Again. Fail Better.” (BECKETT, 2021).

RESUMO

O bom desempenho dos sistemas produtivos durante a operação é dependente da adoção de uma estratégia adequada de manutenção. Nesse sentido, operação e manutenção devem estar alinhadas. Apesar de ser comum intercalar janelas de operação e manutenção do sistema, é notório que as organizações priorizam a operação. Limitações nos recursos organizacionais e a dependência entre os componentes do sistema impõem dificuldades extras ao planejamento da manutenção. Nesse contexto, utilizam-se modelos matemáticos para balizar as decisões de manutenção. Os modelos de Manutenção Seletiva se enquadram nessa proposta. Apesar desses modelos serem explorados na literatura há algum tempo, ainda há oportunidades para aprimoramento; principalmente, no que diz respeito à integração a outros níveis/categorias de planejamento organizacional. Isso constitui o objetivo geral deste trabalho. Nesse sentido, desenvolveram-se modelos que integram o problema de manutenção seletiva ao problema de disponibilização do orçamento de manutenção. Esses modelos ainda captam os desvios entre a condição de operação dos sistemas produtivos e a condição de projeto. Também foi dedicado tempo à modelagem da qualidade das ações imperfeitas e à análise da eficiência do uso dessa categoria de intervenção quanto ao consumo de recursos e promoção de sustentabilidade ambiental. Nessa perspectiva, também se desenvolveram modelos para o planejamento da manutenção a curto prazo. Nesse sentido, considerou-se a dependência econômica entre os componentes do sistema e se propôs um indicador de desempenho com potenciais ganhos para o planejamento a longo prazo (também obtido por meio de modelo). Nos dois contextos, desenvolveu-se um algoritmo para planejamento e resolveram-se exemplos numéricos.

Palavras-chave: integração; modelos; manutenção; planejamento; algoritmo.

ABSTRACT

A proper performance of production systems during operation depends on the adoption of an adequate maintenance strategy. In this sense, operation and maintenance must be aligned. Although it is common to intersperse system operation and maintenance windows, it is clear that organizations prioritize operations. Limitations on organizational resources and the dependence between system components impose extra difficulties on maintenance planning. In this context, mathematical models are used to guide maintenance decisions. Selective Maintenance models fit this proposal. Although these models have been explored in the literature for some time, there are opportunities for improvement; mainly, with regard to integration with other levels/categories of organizational planning. This constitutes the general objective of this text. In this sense, models were developed that integrate the problem of selective maintenance with the problem of maintenance budget, made available in full or in installments. These models also capture the deviations between the operating condition of production systems and the designed ones. Time was also devoted to modeling the quality of imperfect actions and analyzing the efficiency of using this category of intervention in terms of the consumption of organizational resources and in promoting sustainability. In this perspective, models for short-term maintenance planning were also developed. In this sense, the economic dependence between the components of the system was considered and a performance indicator with potential gains for long-term planning (also obtained through a model) was proposed. In both contexts, an algorithm for planning was developed and numerical examples were solved.

Keywords: integration; models; maintenance; planning; algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos e Terminologia e empregada nos Algoritmos Genéticos.....	23
Figura 2 – Funcionamento Genérico de um Algoritmo Genético.....	24
Figura 3 – Ilustração de Seleção por Torneio.....	25
Figura 4 – Ilustração da Seleção por Roleta.....	25
Figura 5 – Ilustração do Cruzamento (a) com um Ponto de Corte e (b) Parcialmente Mapeado.....	26
Figura 6 - Ilustração da Mutação.....	26
Figura 7 - Fluxograma da estratégia de solução.....	33
Figura 8 - Diagrama de bloco do Sistema.....	34
Figura 9 - Propriedades do modelo proposto para a qualidade das ações imperfeitas para os parâmetros de entrada especificados.....	51
Figura 10 – Fluxograma do Procedimento de Solução.....	55
Figura 11 - Diagrama estrutural para o exemplo numérico.....	56
Figura 12 - Custo Esperado de Manutenção em função do Número de Repetições, N	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros dos componentes do sistema.....	35
Tabela 2 - Duração das missões, $U(m)$; grau de severidade das missões, $s(m)$; e níveis de aspiração de confiabilidade para o início de cada missão, $R@(m + 1)$	36
Tabela 3 - Parâmetros das ações preventivas disponíveis para execução nos componentes do sistema.....	36
Tabela 4 - Planos de manutenção obtidos para as duas estratégias orçamentárias.....	37
Tabela 5 - Comparação entre os níveis aspirados e esperados de confiabilidade do sistema ao longo do horizonte de planejamento para as estratégias orçamentárias P1 e P2.....	38
Tabela 6 - Planos de manutenção para os casos do cenário I.....	39
Tabela 7 - Planos de manutenção para os casos do cenário II.....	41
Tabela 8 - Dados dos componentes após o primeiro período de operação.....	56
Tabela 9 - Parâmetros de distribuições Weibull para a vida dos componentes do sistema.....	57
Tabela 10 - Parâmetros das ações de manutenção que podem ser planejadas para o sistema..	57
Tabela 11 - Decisões de manutenção para o planejamento de curto e longo prazos.....	59

LISTA DE SIMBOLOS (CAPÍTULO 03)

m	Missão genérica do sistema
M	Número de missões planejadas para o sistema
$D(m)$	Duração da m -ésima missão
$U(m)$	Duração limite da m -ésima janela de manutenção
$s(m)$	Grau de severidade da m -ésima missão
e	Componente genérico do sistema
E	Número de componentes do sistema
$h_e(t)$	Taxa de falha do componente e
β_e	Parâmetro de forma da distribuição Weibull para o componente e
η_e	Parâmetro de escala da distribuição Weibull para o componente e
$A_e(m)$	Idade virtual do componente e antes da m -ésima janela de manutenção
$B_e(m)$	Idade virtual do componente e após a m -ésima janela de manutenção
l_e	Nível de intervenção de manutenção no componente e
$a_{l_e}(e, m)$	Representa se l_e é executado em e na m -ésima janela de manutenção
$\theta_e(l_e)$	Coefficiente de redução da idade para o nível l_e para o componente e
$opt(\theta_e(l_e))$	Estimativa otimista para o valor de $\theta_e(l_e)$
$mod(\theta_e(l_e))$	Estimativa modal para o valor de $\theta_e(l_e)$
$pes(\theta_e(l_e))$	Estimativa pessimista para o valor de $\theta_e(l_e)$
$E(\theta_e(1))$	Valor esperado para $\theta_e(1)$
mrc_e	Custo do reparo mínimo do componente e
$pmc_e(l_e)$	Custo do nível de manutenção l_e para o componente e
$MRC(m)$	Custo esperado dos reparos mínimos durante a m -ésima missão
$PMC(m)$	Custo da manutenção durante a m -ésima janela de manutenção
$MC(m)$	Custo agregado da m -ésima missão e manutenção do sistema
BGT	Orçamento disponível para manutenção
$BGT(m)$	Orçamento disponível na m -ésima missão e janela de manutenção
$pmd_e(l_e)$	Duração do nível de manutenção l_e para o componente e

$PMD(m)$	Duração da m-ésima janela de manutenção
$R_e(m)$	Confiabilidade do componente e para a m-ésima missão
$R(m)$	Confiabilidade do sistema na m-ésima missão
$R@(m + 1)$	Patamar de confiabilidade para o início da m-ésima missão
N_p	Número de indivíduos na população
C_p	Porcentagem dos melhores indivíduos do subgrupo dos cruzados selecionada
M_p	Porcentagem dos melhores indivíduos do subgrupo dos mutados selecionada
NI_{max}	Número máximo de iterações do algoritmo genético
NG_{imp}	Número de gerações em que um indivíduo permanece como o melhor

LISTA DE SIMBOLOS (CAPÍTULO 04)

e	Componente genérico do sistema
E	Número de componentes do sistema
β_e	Parâmetro de forma da distribuição Weibull para o componente e
η_e	Parâmetro de escala da distribuição Weibull para o componente e
$h_e(t)$	Taxa de falha do componente e
X_e^-	Estado do componente e antes da janela de manutenção do sistema
X_e^+	Estado do componente e após a janela de manutenção do sistema
Ac_e^-	Idade real do componente e antes da janela de manutenção do sistema
Ac_e^+	Idade real do componente e após a janela de manutenção do sistema
A_e^-	Idade virtual do componente e antes da janela de manutenção do sistema
A_e^+	Idade virtual do componente e após a janela de manutenção do sistema
n_e^-	Número acumulado de intervenções imperfeitas antes da janela de manutenção
n_e^+	Número acumulado de intervenções imperfeitas após a janela de manutenção
n_e	Número de intervenções imperfeitas antes de substituir o componente e
D	Duração da operação
U	Duração limite da janela de manutenção
M	Número esperado de operações do sistema antes dele ser renovado
l_e	Nível de intervenção de manutenção no componente e
$z_e(l_e)$	Representa se l_e é executado em e
$\theta_e(l_e)$	Coefficiente de redução da idade para o nível l_e para o componente e
G	Conjunto de componentes a serem mantidos na janela de manutenção
$S_e(G)$	Custo de <i>setup</i> do componente e
S_e^0	Custo nominal de preparação do componente e
ΔS_G	Economia de custo atribuída à preparação do conjunto G de componentes
$c_e(l_e)$	Custo fixo do nível de manutenção l_e no componente e
$C_e(l_e)$	Custo de execução do nível de manutenção l_e no componente e
C_S	Custo de manutenção do sistema durante a janela de manutenção
c_f	Custo de falha do sistema
ΔT_G	Economia de tempo atribuída à preparação do conjunto G de componentes
$t_e(l_e)$	Tempo específico do nível de manutenção l_e no componente e
$T_e(l_e)$	Tempo para execução do nível de manutenção l_e no componente e

T_S	Tempo de manutenção do sistema durante a janela de manutenção
$R_e(D A_e^-)$	Confiabilidade condicional do componente e antes da janela de manutenção
$R_e(A_e^-)$	Confiabilidade incondicional do componente e antes da janela de manutenção
R_S	Confiabilidade condicional do sistema
r_R	Requisito de confiabilidade para retomada da operação do sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	15
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	METODOLOGIA	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO	18
2.2	MODELOS DE MANUTENÇÃO	19
2.3	EFEITO DAS INTERVENÇÕES DE MANUTENÇÃO NO SISTEMA	20
2.4	MODELOS DE MANUTENÇÃO SELETIVA	21
2.5	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	22
2.5.1	Operadores Genéticos.....	24
2.5.1.1	Seleção	24
2.5.1.2	Cruzamento	25
2.5.1.3	Mutação.....	26
3	MODELOS DE MANUTENÇÃO INTEGRADOS A DECISÕES ORÇAMENTÁRIAS.....	27
3.1	INTRODUÇÃO.....	27
3.2	DESCRIÇÃO DA DINÂMICA DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA.....	28
3.3	FORMULAÇÃO DOS PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO SELETIVA	31
3.4	DESCRIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO.....	33
3.5	EXEMPLO NUMÉRICO.....	35
3.6	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E IMPLICAÇÕES GERENCIAIS	38
3.7	CONCLUSÕES.....	41
4	MODELOS DE MANUTENÇÃO INTEGRADOS - DECISÕES DE CURTO E LONGO PRAZOS.....	43
4.1	INTRODUÇÃO.....	43
4.2	MODELAGEM.....	45
4.2.1	Descrição da dinâmica de operação e manutenção do sistema.....	45
4.2.2	Modelo para a qualidade das ações	49

4.3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E DA ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO.....	52
4.4	EXEMPLO NUMÉRICO	56
4.5	CONCLUSÕES.....	60
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A – ESTRATÉGIA PARA SOLUÇÃO DE MODELOS DE MANUTENÇÃO INTEGRADOS A DECISÕES ORÇAMENTÁRIAS	69
	APÊNDICE B – ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO PARA OS MODELOS DE MANUTENÇÃO INTEGRADOS - DECISÕES DE CURTO E LONGO PRAZOS.....	70

1 INTRODUÇÃO

O departamento de Manutenção Industrial é responsável pelo planejamento e execução de intervenções no sistema produtivo das organizações, com o fim de restaurar, manter ou melhorar as condições de operação desses sistemas (SWANSON, 2001). Assim, a efetividade da organização depende da definição de uma estratégia adequada de manutenção (BOGONOVO, MARSEGUERRA e ZIO, 2000).

Para isso, é fundamental que a estratégia de manutenção esteja alinhada à estratégia de operação da organização; ou seja, os departamentos organizacionais de Manutenção e Planejamento de Operações devem trabalhar juntos em prol dos objetivos organizacionais. Esta relação, conturbada no passado, quando a manutenção era vista como um mal necessário, passou a ser mais harmônica em tempos mais recentes, em virtude da percepção da manutenção como um diferencial competitivo para as organizações (ALSYOUF, 2007).

Um indicador direto do bom relacionamento entre Manutenção e Planejamento de Operações é a alocação de paradas para manutenção do sistema entre períodos consecutivos de operação (TSAI, WANG e TENG, 2001; PANDEY *et al.*, 2013). Há, contudo, uma pressão interna para que as durações das janelas de manutenção sejam tão curtas quanto possível. Isto, em conjunto com as restrições nos recursos de manutenção, impede que se executem as intervenções desejáveis no sistema (MAILLART *et al.*, 2009). Assim, é imperativo que o planejamento de manutenção seja efetivo (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Assim, a decisão sobre que ações incluir no plano de manutenção costuma se apoiar em modelos matemáticos, que fazem um balanço entre o consumo de recursos das organizações pelas ações de manutenção e o desempenho do sistema produtivo (SANDVE e AVEN, 1999). Nesse sentido, seleciona-se o conjunto de ações que resulte no maior benefício para as organizações (LIU e HUANG, 2010). Isso, contudo, não é uma tarefa trivial, e originou a classe de Problemas de Manutenção Seletiva (RICE, CASSADY e NACHLAS, 1998). Há, ainda muita oportunidade de aprimoramento daqueles modelos; fato que motivou esse trabalho.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho apresenta contribuições à classe dos problemas de Manutenção Seletiva, mormente no que tange à integração desse problema a outros problemas de planejamento internos às organizações.

1.1.1 Objetivo Geral

Propor modelos que integrem os problemas de Manutenção Seletiva a outros problemas organizacionais, o que aponta para o alinhamento entre Manutenção e Operações.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral foi desdobrado em objetivos específicos, quais sejam:

- Identificar suposições nos modelos de Manutenção Seletiva que possam ser aprimoradas, com o intuito de tornar tais modelos mais intuitivos e/ou práticos;
- Identificar problemas organizacionais passíveis de serem integrados ao problema de Manutenção Seletiva;
- Desenvolver modelos que integrem os problemas organizacionais identificados ao problema de Manutenção Seletiva, prezando pela simplicidade e aplicabilidade dos modelos;
- Elaborar procedimentos para resolução dos modelos integrados;
- Ilustrar a aplicabilidade do modelo e a efetividade do procedimento de resolução;
- Analisar os resultados buscando *insights* gerenciais.

1.2 METODOLOGIA

Além dos objetivos específicos, que evidenciam o fluxo lógico de desenvolvimento deste texto, é necessário caracterizá-lo em termos da Metodologia Científica utilizada. A esse respeito, Turrione e Mello (2012) comentam que a classificação de uma pesquisa varia de autor para autor. Visando classificar este estudo, adotou-se a forma clássica de caracterização de pesquisas em Engenharia de Produção, proposta pelos aludidos autores.

Nesta perspectiva este trabalho é caracterizado quanto à sua natureza, em pesquisa aplicada, já que se propõe a aplicar conceitos matemáticos à modelagem de Problemas de Manutenção, bem como o desenvolvimento de procedimentos para resolução dos problemas formulados. Quanto aos objetivos, este texto se enquadra na categoria de pesquisa explicativa,

em decorrência de buscar identificar os fatores que influenciam nos resultados e na sensibilidade dos modelos. Além disso, quanto à abordagem do problema, esta investigação é classificada como quantitativa, e utiliza o método da modelagem e simulação para atingir os fins a que se propõe.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese está estruturada em cinco partes - sequencialmente: Introdução; Referencial Teórico; Modelos de Manutenção Integrados a Decisões Orçamentárias; Modelos de Manutenção Integrados a Decisões de Curto e Longo Prazos; e Conclusões. A fundamentação teórica e a sumarização dos estudos basilares desta pesquisa são apresentadas no próximo capítulo. Nos dois capítulos seguintes, se cumpre a quase totalidade dos objetivos específicos elencados – parte-se da formulação integrada dos problemas de planejamento, passa-se pela modelagem e resolução desses problemas, e se chega aos *insights* gerenciais por meio das análises dos resultados. Por fim, no capítulo cinco, são apresentadas as conclusões deste trabalho, as dificuldades em realizá-lo e os direcionamentos para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Apresenta-se, neste capítulo, os conceitos gerais que fundamentam este trabalho. Nesse sentido, destaca-se a relevância do planejamento de manutenção através de modelos matemáticos, que considerem vários níveis de intervenção nos componentes. Além disso, explora-se modelos de Manutenção Seletiva e destaca-se a necessidade de métodos eficientes para resolvê-los.

2.1 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

Conforme destacou-se, o bom desempenho dos sistemas produtivos durante a operação está vinculado à efetividade das políticas da manutenção (BORGONOVO, MARSEGUERA e ZIO, 2000; DE ALMEIDA *et al.*, 2015). Em parte, isso se justifica pelo comprometimento do plano de produção, caso o sistema falhe durante a operação (CHUNG *et al.*, 2009). Por outro lado, o alinhamento entre manutenção e produção pode reduzir custos e alavancar a competitividade organizacional (ALSYOUF, 2007).

No geral, as políticas de manutenção visam restaurar ou preservar o sistema no estado operacional e, ainda, podem ter finalidade estratégica. A restauração do sistema ao estado operacional pressupõe a execução de intervenções corretivas em resposta à falha (SAMROUT *et al.*, 2009). A adoção isolada dessa política, contudo, está associada ao aumento de custos e risco ambiental (DING e KAMARUDIN, 2015; SANTOS, CAVALCANTE e RIBEIRO, 2021). Assim, uma política de manutenção mais efetiva também se preocupa em preservar o estado operacional do sistema produtivo.

Nesse sentido, a execução periódica de ações preventivas reduz a probabilidade de falha do sistema (PENG, DONG e ZUO, 2010). A frequência de execução dessas ações pode ser determinada por modelos matemáticos. Pode-se, também, empregar esforços no intuito de monitorar a iminência da falha, adotando-se políticas preditivas. Essa categoria de ações, entretanto, requer uso intensivo de tecnologia (ARUNRAJ e MAITI, 2010).

Por fim, as políticas de manutenção podem ser utilizadas com finalidades estratégicas, conciliando-se Produção e Manutenção. Nesse contexto, a manutenção é responsabilidade de todos (manutenção autônoma) e visa, não só manter o estado operacional, mas também melhorá-lo com vistas a facilitar, e, quiçá, eliminar a necessidade de manutenção (ALSYOUF, 2007; DING e KAMARUDIN, 2015).

2.2 MODELOS DE MANUTENÇÃO

Em suma, uma política efetiva de manutenção, além de proporcionar a operação satisfatória do sistema produtivo, apoia e alavanca a estratégia organizacional. A determinação dessa política, conforme anunciado, se baseia em modelos matemáticos. Numa perspectiva macro, esses modelos são categorizados em determinísticos ou probabilísticos em função de como lidam com as incertezas inerentes à manutenção e operação (VASILI *et al.*, 2011). Nesse contexto, embora os modelos determinísticos tenham valor, eles adotam suposições muito rígidas e podem não retratar bem a realidade (GHOSH e ROY, 2009).

No âmbito específico, os modelos de manutenção são classificados com base no nível de incerteza neles retratados. Tais níveis têm relação com a disponibilidade de informações sobre as variáveis que influenciam os sistemas. Nesse sentido, Ding e Kamaruddin (2015) estratificam os modelos nas categorias: certeza, risco e incerteza. A categoria ‘certeza’ engloba os modelos determinísticos e pressupõe informações completas (conhecimento perfeito) sobre aquelas variáveis, de forma que não são necessários procedimentos bem elaborados para se determinar um bom plano de manutenção (LABIB, 1998).

Os modelos na categoria ‘risco’, por sua vez, utilizam distribuições de probabilidades para modelar as variáveis que atuam sobre o sistema (DING e KAMARUDIN, 2015). Essas distribuições orientam os procedimentos para definição dos planos de manutenção (ANDERS e SUGIER, 2006). Tais procedimentos costumam recorrer à simulação computacional, com vistas a tratar a crescente complexidade inerente aos sistemas produtivos (ALRABGHI E TIWARI, 2015).

Além disso, nos modelos na categoria ‘incerteza’ há desconhecimento sobre as variáveis que influenciam a manutenção do sistema. Nesse contexto, os procedimentos para prescrição de um plano de manutenção satisfatório utilizam-se do julgamento de probabilidades subjetivas (TERSINE, 1995). Uma abordagem alternativa é o uso de métodos multicritério, que permitem trabalhar objetivos conflitantes (VINODH e VARADHARAJAN, 2012).

Em outra direção, Nicolai e Dekker (2008) propuseram a categorização dos modelos de manutenção em função do relacionamento (dependência) entre os componentes dos sistemas produtivos. Nesta abordagem, três tipos de dependência são considerados:

- Dependência estrutural - verificada quando os componentes formam uma parte, que deve ser desmontada sempre que uma ação de manutenção necessite ser executada, o que cria uma oportunidade para o agrupamento de atividades;

- Dependência estocástica (interação de falha) - constatada quando a condição de operação de um componente influencia a distribuição de vida útil de outro(s) componente(s);
- Dependência Econômica – existente quando o custo da manutenção conjunta de um grupo de componentes é diferente do custo da manutenção individual desses componentes - quer os custos sejam diminuídos (dependência econômica positiva), quer os custos sejam aumentados (dependência econômica negativa).

Neste trabalho, há particular interesse na dependência econômica, assim ela é discutida em maiores detalhes. Nesse sentido, a dependência econômica positiva é explicada por economia nos custos de preparação (*setup*), e/ou de indisponibilidade (*downtime*) do sistema. Nesse contexto, Nicolai e Dekker (2008) estratificam o *setup* em único e múltiplo, relacionado a diferentes níveis do sistema e implicando uma hierarquia de *setups*.

A dependência econômica negativa, por sua vez, resulta de limitações no quantitativo de trabalhadores para execução de um conjunto de ações; impedimentos para a execução simultânea de um conjunto de ações, devido a restrições de segurança; e/ou paradas em sistemas com redundância (GRICORIEV, KLUNDERT e SPIEKSMAN, 2006).

Destaca-se que as dependências econômicas positiva e negativa podem coexistir em um sistema, sendo necessária a análise de *trade-off* entre economia e custos implicados pelo conjunto de atividades de manutenção. Van Horrenbeek e Pintelon (2013) também consideram diferentes graus de interação entre os componentes – não dependência, dependência parcial e dependência total.

Nicolai e Dekker (2008) ainda propuseram classificar os modelos de manutenção baseadas em aspectos de planejamento nas categorias: operacional/curto prazo ou estratégico/longo prazo; estático ou dinâmico; horizonte finito, deslizante ou infinito. Alternativamente, esses autores levam em conta o procedimento para obtenção do plano de manutenção para a classificação dos modelos. Ambas as chaves de classificação estão intimamente relacionadas.

2.3 EFEITO DAS INTERVENÇÕES DE MANUTENÇÃO NO SISTEMA

Além da disponibilidade de informações acerca das variáveis que impactam os sistemas produtivos, a definição de uma política efetiva de manutenção envolve a combinação de diferentes tipos de intervenções. Isso requer o conhecimento dos efeitos das ações de

manutenção sobre o estado e a condição de operação dos componentes do sistema, quer parcial - níveis imperfeitos de manutenção preventiva e manutenção corretiva do tipo reparo mínimo - quer total - substituições preventiva e corretiva.

Nesse contexto, as substituições restauram a condição do componente para “tão bom quanto novo” e a substituição corretiva restaura o estado do componente falho para operacional. As substituições, possuem alto custo e demandam grande tempo para execução. Em contraste, as ações de reparo mínimo, apesar de reestabelecerem o estado operacional de um componente falho, não impactam na condição de operação, que permanece “tão ruim quanto antes”. Essa categoria de intervenção tem baixo custo e, geralmente, duração desprezível.

Os níveis imperfeitos de manutenção preventiva, por sua vez, preservam o estado operacional dos componentes e elevam as condições de operação para patamares intermediários entre “tão ruim quanto antes” e “tão bom quanto novo”. Essas ações consomem menos recursos financeiros que os níveis perfeitos de manutenção e demandam menor tempo de execução. Contudo, no que diz respeito à modelagem, essa categoria de intervenção requer maior grau de sofisticação (KALLEN, 2011; TOLEDO *et al.*, 2015).

No geral, a modelagem do efeito de uma ação imperfeita se dá através da redução do tempo percebido de operação do componente (KIJIMA, MORIMURA e SUZUKI, 1998), da alteração da sua taxa de falha (NAKAGAWA, 1998), ou, ainda, pela integração de ambas as abordagens (LIN, ZUO e YAM, 2000). Neste trabalho, optou-se pela primeira alternativa; assim, distingue-se entre a idade real e a idade virtual (tempo percebido) de operação do componente.

2.4 MODELOS DE MANUTENÇÃO SELETIVA

O Problema de Manutenção Seletiva, formulado por Rice, Cassady e Nachlas (1998), integra os planejamentos da produção e da manutenção nas organizações. Para isso, os modelos refletem a dinâmica operacional e as limitações nos recursos de manutenção. Os aludidos autores ilustram este fato em um exemplo numérico e empregam um método exato para se chegar à solução.

Esse modelo foi ampliado por Chen, Meng e Zuo (1999), que utilizaram a abordagem do caminho mínimo para modelar o problema, resolvendo-o através de um método baseado no algoritmo de Dijkstra. Esse procedimento, contudo, também é ineficiente, em termos do esforço computacional.

Posteriormente, Cassady, Pohl e Murdock (2001.a) consideraram a possibilidade de ações de reparo mínimo para os componentes do sistema. Os autores resolveram o problema por um método exaustivo, para um único período de planejamento, e empregaram o método de Monte Carlo, para horizontes maiores.

Além disso, Cassady, Pohl e Murdock (2001.b) modelaram o problema para diferentes contextos organizacionais e estruturas de sistema. Schneider e Cassady (2004), por sua vez, ampliaram essa perspectiva ao aplicar o modelo a frotas. No que diz respeito ao método de solução, esses autores combinaram os métodos de Monte Carlo e de enumeração exaustiva, tal que a simulação fornecia informações do pós-operação e o método exaustivo fornecia informações do pós-manutenção.

Maillart *et al.* (2009) investigaram a transição da modelagem do problema de um período (formulação míope) para mais de um período de planejamento, abrangendo tanto o horizonte finito quanto o infinito. Os autores concluíram que o ganho de desempenho do sistema não justificou o aumento do esforço computacional. Esse resultado, entretanto, está vinculado a muitas hipóteses e não se sustenta em outras aplicações.

Khatab, Dahane e Ait-Kadi (2014) flexibilizaram o modelo anterior ao disponibilizar níveis imperfeitos de manutenção preventiva, em sintonia com os trabalhos de Liu e Huang (2010) e Maaroufi, Chelbi e Rezg (2013). Khatab e Aghezzaf (2016) também desenvolveram esse tema, vinculando a qualidade das ações ao grau de perícia do mantenedor e recorrendo a distribuições de probabilidade para modelagem.

Além disso, tem-se explorado outras fronteiras dos modelos de Manutenção Seletiva. Nesse sentido, considerou-se a possibilidade de sistemas multiestado, em complemento à hipótese operacional-falho (DAO e ZUO, 2017). Em outras direções, Dao, Zuo e Pandey (2014) e Xu *et al.* (2016) consideraram a interação econômica entre os componentes sistema e Khatab *et al.* (2017) investigaram janelas de manutenção com durações probabilísticas. Ademais, tem-se integrado os modelos de Manutenção Seletiva a modelos de Planejamento de Operações. Nessa perspectiva, Khatab *et al.* (2018) estudaram a alocação de recursos humanos às tarefas de manutenção.

2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

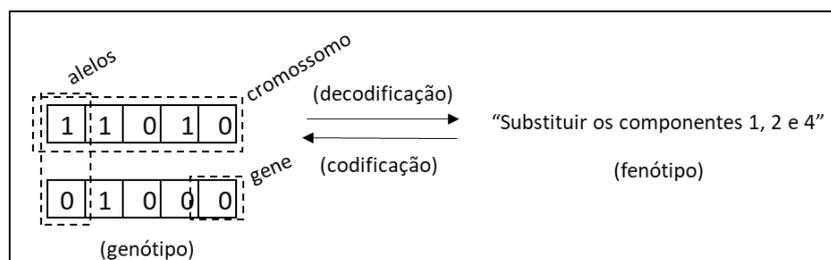
Devido à complexidade e o caráter combinatório dos problemas de Manutenção Seletiva, é inviável continuar a resolvê-los por métodos exaustivos. Nesse contexto, os métodos heurísticos são uma boa alternativa de solução. Dentre esses, sobressaem-se os Algoritmos

Genéticos (AGs) tanto pela adaptabilidade (CASTRO, 2001), quanto por proverem soluções de boa qualidade e em tempo computacional factível (HICKS, 2006).

Genericamente, os AGs são técnicas computacionais de busca iterativa inspirados nos mecanismos da genética (GOLDBERG, 1989); por isso, utilizam nomenclatura emprestada dessas áreas. Nesse sentido, as possíveis soluções do problema são denominadas indivíduos; as informações contidas nessas soluções são codificadas em uma matriz chamada de cromossomo, tal que cada célula recebe o nome de gene e cada possibilidade de valor assumido por uma célula é intitulada alelo.

Além disso, denomina-se genótipo à determinada combinação de genes que especificam um indivíduo, ao passo que o significado da informação codificada no genótipo recebe o epíteto de fenótipo. Ambos os conceitos se relacionam pelos processos de codificação e decodificação, considerados por Sivanandam e Deepa (2008) como determinantes para a eficiência do algoritmo. Esses conceitos e processos são ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Processos e Terminologia empregada nos Algoritmos Genéticos



Fonte: O Autor (2021).

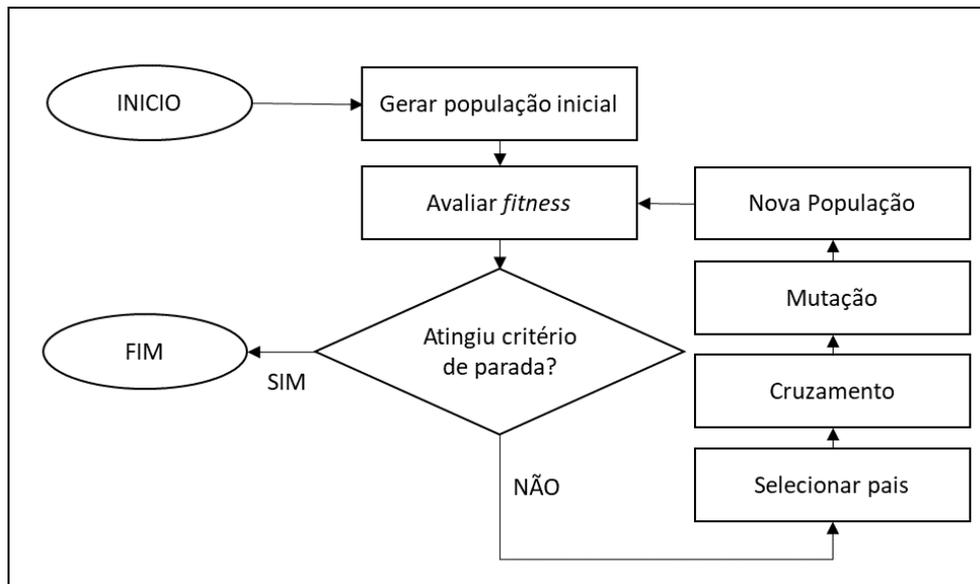
Ademais, o conjunto de indivíduos formam uma população; cada iteração do algoritmo representa uma geração; e a aptidão do indivíduo, em termos do indicador de desempenho utilizado no modelo, é denominada *fitness*. Este conceito é recorrente nos processos de seleção natural, tal que o indivíduo com melhor aptidão tem maior chance de propagar suas características genéticas ao longo das gerações (BLICKLE e THIELE, 1995).

Os indivíduos que compõem a população inicial são gerados de forma aleatória. Além disso, a transmissão das informações genéticas ao longo das gerações se dá pelo intercâmbio do material genético (cruzamento) dos indivíduos (pais) para formar novos indivíduos (filhos). Nesse contexto, o melhoramento do genótipo ao longo das gerações acontece mediante a seleção de pais de boa genética.

Os indivíduos filhos ainda estão sujeitos à mutação, que consiste na troca da informação de um gene por um dos alelos. A operação de mutação aumenta a diversidade dos indivíduos na população e evita a convergência prematura do algoritmo (KONAK, COIT e SMITH, 2006).

No que diz respeito à resolução do problema, o plano de manutenção é obtido quando se cumpre algum critério de parada do algoritmo, após sucessivas operações genéticas (seleção, cruzamento e mutação) entre os indivíduos da população (KANCEV, GJORGIEV e CEPIN, 2011). Este processo está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Funcionamento Genérico de um Algoritmo Genético



Fonte: Adaptado de Kancev, Gjorgiev e Cepin (2011).

2.5.1 Operadores Genéticos

Neste tópico, detalha-se os operadores genéticos e ilustra-se as formas mais usuais de implementação.

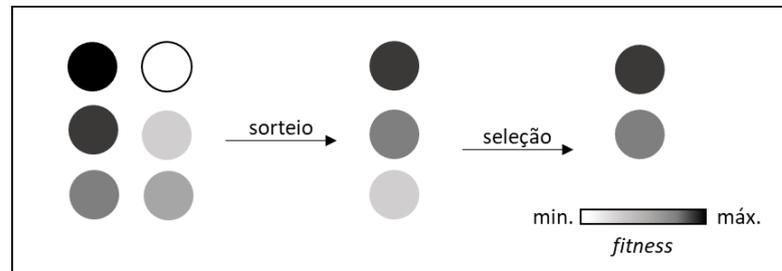
2.5.1.1 Seleção

Essa operação simula o processo de seleção natural, tal que os indivíduos com melhor desempenho na população têm maior chance de ter suas informações genéticas perpetuadas para a próxima geração (KANCEV, GJORGIEV e CEPIN, 2011). Destaca-se que a adoção de uma estratégia elitista, que selecione os melhores indivíduos, pode implicar na convergência prematura do algoritmo (RAZALI e GERAGHTY, 2011).

Dentre os procedimentos de seleção, a seleção por torneio é muito popular devido à eficiência e por ser de fácil implementação (GLOVER e KOCHENBERG, 2003). Esse procedimento se baseia no conceito de competição e consiste na formação de subconjuntos da

população por meio de sorteio, tal que os indivíduos mais aptos nesse subconjunto são promovidos para a próxima geração (Figura 3). Pontua-se que há chance de todos os indivíduos serem selecionados (RAZALI e GERAGHTY, 2011).

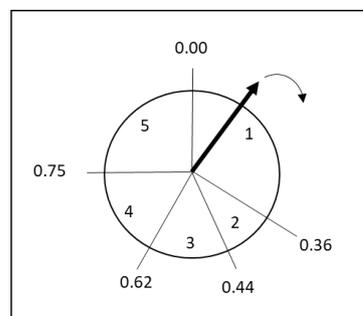
Figura 3 – Ilustração de Seleção por Torneio



Fonte: O Autor (2021).

Uma estratégia distinta e, também, recorrente na literatura é a seleção por roleta. Nesse procedimento os indivíduos são dispostos em uma roleta cujas celas são proporcionais ao *fitness* desses indivíduos, gera-se um número aleatório (ponteiro) que identifica qual indivíduo será promovido para a geração posterior – Figura 4.

Figura 4 – Ilustração da Seleção por Roleta



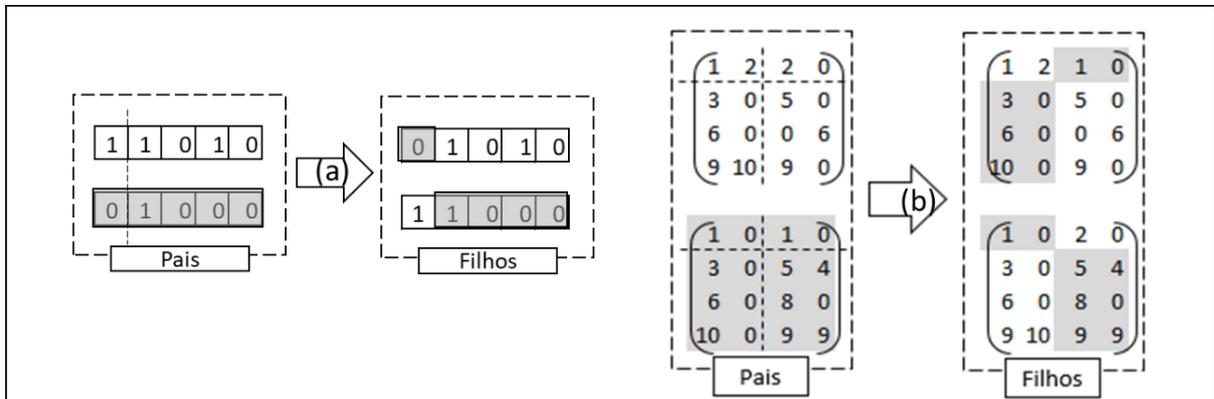
Fonte: O Autor (2021).

2.5.1.2 Cruzamento

Conforme anunciado, a recombinação das informações genéticas dos indivíduos selecionados é função do operador de cruzamento. Neste trabalho há particular interesse no cruzamento com ponto(s) de corte e na estratégia de cruzamento parcialmente mapeado. A primeira formulação consiste na determinação, por sorteio, de um ponto de corte – fronteira entre dois genes de um cromossomo - seguida do intercâmbio das partes homólogas. A segunda

estratégia corresponde à estratégia anterior aplicada a mais de uma dimensão da matriz. A Figura 5 ilustra ambos os procedimentos.

Figura 5 – Ilustração do Cruzamento (a) com um Ponto de Corte e (b) Parcialmente Mapeado

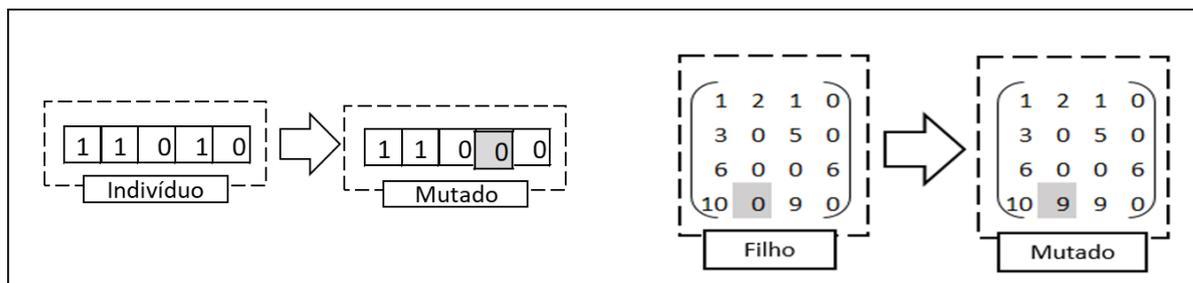


Fonte: O Autor (2021).

2.5.1.3 Mutação

Por fim, o operador de mutação modifica a informação contida no gene de um cromossomo (Figura 6). Destaca-se, que esse efeito deve ser pouco frequente, de modo a não se incorrer em algoritmos de salto aleatório (SIVANANDAM e DEEPA, 2008).

Figura 6 - Ilustração da Mutação



Fonte: O Autor (2021)

3 MODELOS DE MANUTENÇÃO INTEGRADOS A DECISÕES ORÇAMENTÁRIAS

Neste capítulo, integra-se um problema de Manutenção Seletiva a um problema de disponibilização do orçamento de manutenção. Para isso, consideram-se os efeitos da disponibilização integral e parcelada desse orçamento ao longo do horizonte de planejamento. Além disso, leva-se em conta o efeito dos desvios entre as condições de operação projetadas e esperadas para o sistema produtivo. As intervenções preventivas imperfeitas também são exploradas neste capítulo – dá-se ênfase ao modelo de qualidade e ao fato delas proporcionarem o consumo eficiente dos recursos de manutenção. Ademais, desenvolve-se um algoritmo para a solução do modelo. Alguns resultados deste capítulo já foram apresentados em conferências (RIBEIRO, CAVALCANTE e RODRIGUEZ, 2016; RIBEIRO, DANTAS e CAVALCANTE, 2018; RIBEIRO e CAVALCANTE 2018).

3.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas produtivos desgastam durante a operação. Assim, para garantir níveis adequados de produção, faz-se necessária a manutenção desses sistemas (DE ALMEIDA *et al.*, 2015). Nesse contexto, tanto a dinâmica de operação dos sistemas quanto a disponibilidade de recursos de manutenção impõem restrições à execução da manutenção. Assim, a produtividade do sistema depende da efetividade do planejamento da manutenção. Isso é particularmente evidente no caso de sistemas orientados a missões, tal que a manutenção deva ser executada em uma janela entre duas fases consecutivas de operação – como um ônibus, que fica parado para manutenção entre séries de viagens consecutivas.

A magnitude da janela para realização da manutenção é negligenciada em alguns modelos para planejamento da manutenção, que ora consideram a duração das atividades de manutenção desprezíveis, ora consideram a duração dessa janela infinita. Isso pode ser aceitável em modelos voltados a sistemas com um único componente, contudo precisa ser considerado para sistemas multicomponentes, dado a baixa chance de que se executem todas as ações desejáveis durante a parada do sistema (MAILLART *et al.*, 2009).

Além disso, restrições na dinâmica da operação e nos recursos organizacionais para a manutenção limitam o conjunto de ações que podem ser realizadas. Assim, um plano efetivo de manutenção deve conter as ações que mais contribuam para o desempenho do sistema, respeitando as restrições (CASSADY, POHL e MURDOCK, 2001b; KHATAB e AGHEZZAF,

2016). Essa descrição caracteriza um problema de Manutenção Seletiva (RICE, CASSADY e NACHLAS, 1998) e é explorado neste capítulo.

Nesse sentido, os planos de manutenção costumam seguir as recomendações dos fabricantes dos equipamentos, no que tange à periodicidade e às características das ações a serem realizadas. Desconsidera-se, entretanto, que as condições de operação do equipamento na organização possam diferir das condições projetadas pelo fabricante (CHEN, LIU e HUANG, 2012; DAO e ZUO, 2017; SIBIDE *et al.*, 2017). Assim, uma contribuição dos modelos desenvolvidos neste capítulo diz respeito a considerar o grau de severidade das operações do sistema no planejamento da manutenção.

Além disso, a execução das ações de manutenção está sujeita a fatores humanos, que influenciam na qualidade da intervenção e, conseqüentemente, na condição de operação dos componentes do sistema. Nesta perspectiva, Kijima, Morimura e Suzuki (1988) propuseram um modelo que relaciona a qualidade das ações à condição de operação do componente. Neste capítulo, utiliza-se uma generalização desse modelo, considerando o fato de que um erro humano possa piorar a condição de operação do componente (PHAM e WANG, 1996; FERREIRA, FIRMINO e CRISTINO, 2015). Ainda, propõe-se um modelo intuitivo para representar a incerteza relacionada à qualidade das ações, comumente assumida como determinística (KHATAB e AGHEZZAFB, 2016).

Ademais, os modelos de manutenção seletiva assumem que o orçamento de manutenção, geralmente utilizado como restrição (CASSADY, POHL e MURDOCK, 2001b), é disponibilizado integralmente no início do horizonte de planejamento. Esta suposição, entretanto, não é verossímil para organizações de pequeno porte, que financiam a manutenção com o retorno financeiro da operação precedente. Também, pode ser uma estratégia desvantajosa para organizações maiores, que imobilizariam o capital que poderia estar sendo investido em outros setores da organização. Esta lacuna é preenchida neste capítulo, integrando-se o problema de estratégia orçamentária ao problema de manutenção seletiva.

3.2 DESCRIÇÃO DA DINÂMICA DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA

Seja um sistema orientado à execução de uma sequência de M operações, cujas durações, denotadas $D(m)$ ($m = 1, \dots, M$), são definidas pelo departamento de Planejamento de Operações da organização. Durante a operação do sistema, cada um dos seus E componentes desgasta. O desgaste dos componentes é proporcional ao grau de severidade da operação,

denotada $s(m)$, e definida pela relação entre as condições projetada e prevista de operação na missão. O acúmulo desse desgaste culmina na falha do componente.

A falha do componente e ($e = 1, \dots, E$) é modelada por uma distribuição Weibull com parâmetro de forma β_e ($\beta_e > 1$) e parâmetro de escala η_e ($\eta_e > 0$), de onde se obtém a taxa de falha do componente, $h_e(t)$:

$$h_e(t) = \frac{\beta_e}{\eta_e} \left(\frac{t}{\eta_e}\right)^{\beta_e-1} \quad (1)$$

O Planejamento de Operações também programa paradas entre duas operações consecutivas. Estas paradas têm durações limitadas, denotadas $U(m)$ ($m = 1, \dots, M - 1$), durante as quais o sistema é disponibilizado para manutenção. Isto visa manter o nível de desgaste do sistema abaixo de um patamar desejável para o início de uma nova operação.

A falha do componente e se restringe ao período de operações e é instantaneamente detectada. O departamento de manutenção da organização executa uma ação de reparo mínimo sempre que um componente falhar, esta ação restaura o componente falho ao estado operacional, porém a condição de operação permanece `tão ruim quanto antes`. Além disso, esta modalidade de intervenção apresenta duração insignificante (em comparação à duração da operação) e custo mrc_e inerente ao componente e .

Em consequência dessa estratégia, a parada de manutenção é exclusiva para a execução de ações preventivas – quer de nível perfeito (substituição), quer de nível imperfeito. Com o intuito de modelar o efeito destas ações para os componentes, adapta-se o modelo de idade virtual de Kijima, Morimura e Suzuki (1988). Nesse sentido, a substituição reseta a idade virtual (a idade real do componente também é resetada) e restaura a condição do componente para `tão bom quanto novo`. Por outro lado, a intervenção imperfeita modifica a idade virtual de um componente de duas formas possíveis:

- Para um valor menor ou igual à idade virtual anterior - esse efeito é contemplado pelo modelo de Kijima, Morimura e Suzuki (1988) e resulta em uma condição de operação intermediária entre `tão ruim quanto antes` e `tão bom quanto novo`;
- Para um valor maior que a idade virtual anterior – essa adaptação amplia o modelo de Kijima, Morimura e Suzuki (1988) por englobar a possibilidade de que uma ação de manutenção resulte em um componente com condição de operação `pior que a anterior`. Isto é consequência da ocorrência de um erro humano durante a execução da intervenção (EMAMI-MEHRGANI *et al.*, 2016; FERREIRA, FIRMINO e CRISTINO, 2015; PHAM e WANG, 1996).

De forma mais específica, a magnitude da modificação da idade virtual do componente em um modelo de idade virtual é mensurada em termos do coeficiente de redução da idade, aqui denotado por $\theta_e(l_e)$, onde l_e representa o nível da intervenção. Quanto menor o valor de $\theta_e(l_e)$, maior a redução da idade virtual, de forma que há um rejuvenescimento completo do componente quando $\theta_e(l_e) = 0$ e uma redução nula, quando $\theta_e(l_e) = 1$. Para fins da modelagem, o nível de manutenção $l_e = 2$ representa a substituição; $l_e = 1$ representa a ação preventiva imperfeita; e a não manutenção do componente é representada pelo nível $l_e = 0$.

Geralmente, assume-se um valor determinístico para o coeficiente de redução de idade (KHATAB e AGHEZZAF, 2016) porém, em virtude das ações imperfeitas serem suscetíveis a fatores humanos, acredita-se que um modelo estocástico seja mais adequado. Neste trabalho, escolheu-se a distribuição triangular para esse fim. Logo, $\theta_e(l_e) \sim \text{triangular} [\text{opt}(\theta_e(l_e)); \text{mod}(\theta_e(l_e)); \text{pes}(\theta_e(l_e))]$, onde os parâmetros $\text{opt}(\theta_e(l_e))$, $\text{mod}(\theta_e(l_e))$, $\text{pes}(\theta_e(l_e))$ são, respectivamente, as estimativas otimista, modal e pessimista para o valor de $\theta_e(l_e)$.

Assim, sendo $A_e(m)$ e $B_e(m)$ as idades virtuais do componente e , respectivamente, no início e no final da m -ésima operação, tem-se que:

- $B_e(m) = A_e(m) + s(m) * D(m)$, ($m = 1, \dots, M$);
- $A_e(m + 1) = B_e(m) * \theta_e(l_e)$, ($m = 1, \dots, M - 1$);
- $\theta_e(2) = 0$ e $\theta_e(0) = 1$;
- $\theta_e(1) \geq 1$, caso haja erro humano na execução da intervenção imperfeita.

Além de especificado pelo coeficiente de redução da idade, cada nível de manutenção l_e está vinculado a um custo, denotado $\text{pmc}_e(l_e)$, e a uma duração, denotada $\text{pmd}_e(l_e)$, conhecidos e constantes. Em virtude disto, o departamento de Manutenção precisa atentar ao orçamento organizacional para a manutenção e aos limites para as durações das paradas de manutenção, dado que esses indicadores restringem o conjunto de ações passíveis de serem executadas. Nesse contexto, assume-se que as ações sejam realizadas em sequência.

De forma geral, tem-se que $\text{pmc}_e(1) < \text{pmc}_e(2)$ e $\text{pmd}_e(1) < \text{pmd}_e(2)$, logo as ações imperfeitas figuram como alternativas interessantes no que tange ao uso eficiente do tempo e do orçamento. Yeh, Lo e Yu (2011), Lo e Yu (2013) e Santos, Cavalcante e Ribeiro (2021)

ratificam esse argumento e destacam o fato de que essa categoria de intervenção promove proteção ambiental, uma vez que se evita o descarte. As aspirações para a confiabilidade do sistema para o início de cada missão, contudo, não podem ser desconsideradas.

De forma específica, o custo agregado da m -ésima operação e manutenção do sistema, denotado $MC(m)$, consiste na soma do custo esperado dos reparos mínimos executados durante a fase de operação, denotado $MRC(m)$, e do custo das atividades de manutenção durante janela de manutenção do sistema, denotado por $PMC(m)$. Esses valores são explicitados pelas equações:

$$MRC(m) = \sum_{e=1}^E mrc_e \int_{A_e(m)}^{B_e(m)} h_e(x) dx \quad (\text{Equação 2})$$

$$PMC(m) = \sum_{e=1}^E \sum_{l_e=1}^2 pmc_e(l_e) \cdot a_{l_e}(e, m) \quad (\text{Equação 3})$$

onde $a_{l_e}(e, m)$ é uma variável de decisão binária que recebe valor unitário se o nível de ação l_e for executado no componente e na m -ésima janela de manutenção. A duração desta janela de manutenção é dada por:

$$PMD(m) = \sum_{e=1}^E \sum_{l_e=1}^2 pmd_e(l_e) \cdot a_{l_e}(e, m) \quad (\text{Equação 4})$$

Por sua vez, o cálculo da confiabilidade do sistema na m -ésima missão, denotada $R(m)$, pressupõe o conhecimento do diagrama de blocos do sistema e da confiabilidade de cada componente, denotada $R_e(m)$, dada pela expressão:

$$R_e(m) = \exp\left(-\int_{A_e(m)}^{B_e(m)} h_e(t) dt\right) \quad (\text{Equação 5})$$

Destaca-se que, em virtude da natureza estocástica da qualidade das ações imperfeitas, $R(m)$ e $MC(m)$ devem ser obtidos por cálculo das expectativas de longo prazo. Para isso, utiliza-se o valor esperado para o coeficiente de redução da idade, dado por:

$$E(\theta_e(1)) = [\text{opt}(\theta_e(1)) + \text{mod}(\theta_e(1)) + \text{pes}(\theta_e(1))]/3 \quad (\text{Equação 6})$$

3.3 FORMULAÇÃO DOS PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO SELETIVA

Conforme descrito, ao término de cada operação, efetua-se a manutenção do sistema com vistas a manter o bom desempenho para a próxima fase de operação. Nesse sentido, os objetivos da Manutenção precisam estar alinhados aos objetivos do Planejamento de Operações. Para

isso, o plano de manutenção precisa considerar as restrições de duração das janelas de manutenção, as expectativas de confiabilidade para início de cada operação e o orçamento disponibilizado para a manutenção, que limitam o conjunto de ações que podem ser executados durante a parada do sistema.

A decisão sobre em quais componentes intervir e o nível destas intervenções requer que um indicador de desempenho seja utilizado para orientar o planejamento da manutenção. A escolha desse indicador deve observar a especificidade do sistema. No caso de sistemas orientados a serviços, a escolha da duração da janela de manutenção é adequada, já que a manutenção implica em indisponibilidade do serviço ao consumidor.

Logo, é desejável que a manutenção dure tão pouco quanto o necessário (Equação 7) para satisfazer as restrições. Nesse sentido, vetam-se planos que custem mais que o orçamento disponível para manutenção, denotado BGT (Equação 8), que não elevem a confiabilidade do sistema acima de um patamar de confiabilidade para o início da operação, denotado $R@(m + 1)$ (Equação 9), ou que durem mais que o limite $U(m)$ da janela de manutenção (Equação 10). Segue o modelo de programação matemática para esse problema:

$$P1: \text{Minimar } \sum_{m=1}^{M-1} PMD(m) \quad (\text{Equação 7})$$

Sujeito a:

$$MRC(M) + \sum_{m=1}^{M-1} MC(m) \leq BGT \quad (\text{Equação 8})$$

$$R(m + 1) \geq R@(m + 1) \quad (\text{Equação 9})$$

$$PMD(m) \leq U(m) \quad (\text{Equação 10})$$

$$\sum_{l_e=0}^2 a_{l_e}(e, m) = 1 \quad (\text{Equação 11})$$

$$a_{l_e}(e, m) \in \{0,1\} \quad (\text{Equação 12})$$

$$e = 1, \dots, E; a_{l_e} \in \{\text{'substituir'}, \text{'ação imperfeita'}, \text{'não intervir'}\}; m = 1, \dots, M$$

a Equação 11 impede que se planeje mais de um nível de manutenção por componente/parada.

Além disso, em virtude da importância dos custos para as organizações, são necessárias discussões adicionais relacionadas à restrição orçamentária (Equação 8). Nesse sentido, a disponibilização parcelada do orçamento de manutenção é mandatória para organizações de pequeno porte. Essa estratégia também pode ser benéfica para organizações de maior porte, pois permite investimento em outros departamentos da organização. Logo, analisam-se os

efeitos de disponibilização do orçamento de manutenção em uma e em múltiplas parcelas ao longo do horizonte de planejamento. Esta análise associa um problema de disponibilização do orçamento ao problema de Manutenção Seletiva (problema P2). Para isso, altera-se a Equação 8 para:

$$MC(m) \leq BGT(m) \quad (\text{Equação 13})$$

onde $BGT(m)$ denota a soma da parcela do orçamento disponibilizado no m -ésimo período de operação e manutenção do sistema ao orçamento restante do período predecessor. Esse modelo abrange os problemas de divisão em parcelas homogêneas e heterogêneas do orçamento e é facilmente adaptado para o caso quando o orçamento restante do período anterior não possa ser aproveitado nos períodos seguintes.

3.4 DESCRIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Os problemas de Manutenção Seletiva têm natureza combinatória, assim, é inviável resolver certas instâncias por métodos exatos. Logo, é comum a utilização de métodos (meta)heurísticos para a obtenção de uma boa solução em um tempo computacional factível (KHATAB e AGHEZZAFB, 2016). Dessa forma, buscou-se resolver os problemas descritos na seção anterior através de um Algoritmo Genético, beneficiando-se de sua adaptabilidade e da qualidade da solução por eles fornecida. Uma vez escolhida a técnica a ser utilizada, é necessária uma descrição mais detalhada do funcionamento do algoritmo em termos das operações genéticas, dos parâmetros de entrada e da forma de representação das soluções.

Nesse sentido, uma solução (indivíduo) é representada por uma matriz (Figura 5b), que especifica as ações de manutenção a serem executadas no sistema a cada parada do sistema. Nessa forma de representação as linhas expressam os componentes, as colunas representam as janelas de manutenção e uma célula corresponde ao nível de manutenção a ser executado em um determinado componente durante determinada parada.

Na primeira iteração (geração) do algoritmo, indivíduos são criados atribuindo-se valores aleatórios a cada célula da matriz. Avalia-se, então, se o indivíduo gerado viola alguma restrição do modelo. Caso negativo, ele é inserido na população até que haja N_p indivíduos. A exclusão de indivíduos inviáveis nessa fase impacta na velocidade de convergência e na qualidade das soluções. A adoção de uma meta orçamentária, entretanto, garante que qualquer solução fornecida pelo algoritmo seja, no mínimo, boa.

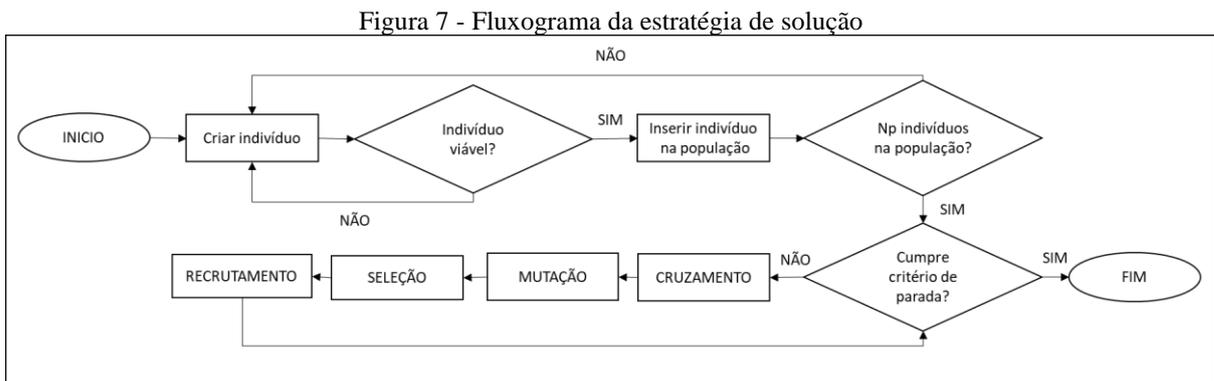
A primeira geração é então submetida ao operador de cruzamento. Para isso, os indivíduos são agrupados, aleatoriamente, em pares. Cada par gera dois novos indivíduos pelo intercâmbio de informações genéticas, seguindo a estratégia de cruzamento parcialmente mapeado (GOLDBERG, 1989). Nesta operação, não se avalia a viabilidade dos descendentes.

Em seguida, esses descendentes são submetidos ao operador de mutação, a fim de garantir a preservação da diversidade genética ao longo das iterações e evitar a convergência precoce do algoritmo (KONAK, COIT e SMITH, 2006). Essa operação clona a população dos descendentes e modifica um gene (célula) aleatoriamente escolhido em cada um dos clones. A avaliação de viabilidade desses indivíduos também não é executada nesta operação.

O operador de seleção é responsável pela preservação das informações genéticas e melhoria da qualidade das soluções ao longo das iterações. Nessa operação, o melhor indivíduo da geração corrente é promovido para a geração seguinte. Isso mantém o registro da melhor solução a cada geração. Além disso, excluem-se os indivíduos inviáveis dos conjuntos dos indivíduos descendentes e dos mutados. Os indivíduos remanescentes nesses dois subconjuntos são promovidos para a geração subsequente com base no desempenho (ou seja, estratégia elitista), sendo selecionados $C_p * N_p$ descendentes e $M_p * N_p$ mutados, onde C_p e M_p são porcentagens escolhidas para que $1 + C_p * N_p + M_p * N_p < N_p$.

Por fim, adotou-se um operador de recrutamento visando preservar o tamanho da população ao longo das iterações. Essa operação introduz indivíduos viáveis, gerados aleatoriamente, na geração seguinte. Isso pode ser interpretado como a chegada de indivíduos não nativos à comunidade local; ocorrência que aumenta a diversidade da geração futura.

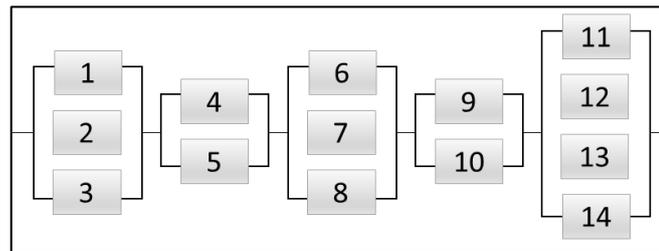
As iterações são executadas até que um critério de parada (número máximo de iterações, NI_{max} , ou um indivíduo permaneça ótimo por NG_{imp} gerações do algoritmo) seja alcançado. A lógica do algoritmo é apresentada na Figura 7 (e no Apêndice A).



3.5 EXEMPLO NUMÉRICO

A aplicabilidade do modelo é demonstrada através de um exemplo numérico. Para isso, seja o sistema composto por $E = 14$ componentes, cuja estrutura é exibida na Figura 8.

Figura 8 - Diagrama de blocos do Sistema



Fonte: O Autor (2021).

A confiabilidade do sistema na m -ésima missão é dada pela Equação 14:

$$\begin{aligned}
 R(m) = & \{1 - [1 - R_1(m)] * [1 - R_2(m)] * [1 - R_3(m)]\} \\
 & * \{1 - [1 - R_4(m)] * [1 - R_5(m)]\} \\
 & * \{1 - [1 - R_6(m)] * [1 - R_7(m)] * [1 - R_8(m)]\} \\
 & * \{1 - [1 - R_9(m)] * [1 - R_{10}(m)]\} \\
 & * \{1 - [1 - R_{11}(m)] * [1 - R_{12}(m)] * [1 - R_{13}(m)] * [1 - R_{14}(m)]\}
 \end{aligned}$$

As vidas dos E componentes desse sistema seguem distribuições *Weibull*(β_e, η_e), cujos parâmetros são exibidos na Tabela 1, assim como os custos de reparo mínimo, mrc_e .

Tabela 1 - Parâmetros dos componentes do sistema

e	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
β_e	1.5	2.4	1.6	2.6	1.8	2.4	2.5	2	1.2	1.4	2.8	1.5	2.4	2.2
η_e	37.5	57	42	60	42	51	39	42	39	52.5	60	52.5	45	67.5
mrc_e	3	4	3	5	2	3	6	5	3	6	7	4	6	3

Fonte: O Autor (2021).

Planeja-se a operação desse sistema para uma sequência de 15 missões intercaladas por paradas de manutenção. As durações, o grau de severidade (relacionado à razão entre as condições de operação projetadas e esperadas) e os níveis alvo de confiabilidade para o início de cada missão (dependentes das aspirações gerenciais), bem como a duração limite da janela de manutenção são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Duração das missões e janelas de manutenção; grau de severidade das missões; e níveis de aspiração de confiabilidade para o início de cada missão

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$D(m)$	11	12	11	13	11	13	10	10	13	11	11	13	13	10	13
$U(m)$	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	-
$s(m)$	1	1.05	1	1.1	1	1.1	0.95	0.95	1.1	1	1	1.1	1.1	0.95	1.1
$R@(m + 1)$	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	-

Fonte: O Autor (2021).

Os níveis de manutenção disponíveis para cada componente do sistema, seus respectivos custos, $pmc_e(l_e)$, durações, $pmd_e(l_e)$, e demais parâmetros são apresentados na Tabela 3. Cabe destacar que $opt(\theta_e(2)) = mod(\theta_e(2)) = pes(\theta_e(2)) = 0$. Além disso, pontua-se que algumas ações imperfeitas não sofrem variação associadas à experiência dos mantenedores, como aquela disponível para o componente 1. Enquanto isso, outras ações imperfeitas são suscetíveis a erros humanos, como aquela disponível para o componente 2.

Tabela 3 - Parâmetros das ações preventivas disponíveis para execução nos componentes do sistema

Componente (e)	Nível Imperfeito					Nível Perfeito	
	$opt(\theta_e(1))$	$mod(\theta_e(1))$	$pes(\theta_e(1))$	$pmc_e(1)$	$pmd_e(1)$	$pmc_e(2)$	$pmd_e(2)$
1	0.6	0.6	0.6	6.9	0.25	14.1	0.55
2	0.21	0.46	1.05	8.2	0.35	18	0.65
3	0.31	0.52	0.54	6.9	0.25	14.1	0.37
4	0.46	0.68	0.88	9.7	0.3	15.5	0.58
5	0.39	0.41	1.06	9	0.37	14.2	0.75
6	0.36	0.36	0.56	8.1	0.25	16	0.75
7	0.45	0.55	0.76	8.3	0.87	16.25	1.5
8	0.45	0.62	0.83	7.3	0.75	16.5	1.65
9	0.42	0.61	1.04	8.3	0.25	12.5	0.42
10	0.28	0.49	0.62	9.2	0.38	15.4	0.8
11	0.6	0.6	0.6	6	0.25	13.9	1
12	0.37	0.43	0.43	7.9	0.45	12	0.95
13	0.22	0.25	0.57	6.7	0.45	14	1.15
14	0.37	0.43	0.43	7.8	0.52	16.5	1.55

Fonte: O Autor (2021).

Quanto à solução do problema, dada a adaptabilidade dos algoritmos genéticos, poucas alterações foram necessárias para ajustar a estratégia de solução para ambos os modelos. Definiu-se uma população de $N_p = 8$ indivíduos, os percentuais $C_p = M_p = 0,375$ para a

operação de seleção e \$1650 como o orçamento de manutenção (integral ou em parcelas iguais). Por fim, os parâmetros de parada foram estabelecidos: $NI_{max} = 15$ iterações ou $NG_{imp} = 5$ gerações. A Tabela 4 exibe as ações de manutenção recomendadas por componentes para a disponibilização integral (modelo P1) e parcelada (modelo P2) do orçamento. Sugere-se não intervir nos componentes que não aparecem na tabela.

Tabela 4 - Planos de manutenção obtidos para as duas estratégias orçamentárias

Paradas	Orçamento Integral (P1)		Orçamento Parcelado (P2)	
	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas
1	1; 5	2; 3; 7; 9; 12; 13	2; 9	3; 4; 6; 7; 8; 13
2	6; 8; 12	2; 5; 13; 14	11; 12; 13	8
3	1; 2; 4; 14	3; 5; 8; 9; 10	2; 5; 8	6; 10; 13
4	2; 9; 10	3; 7; 11; 12; 13	1; 2; 6; 9	4; 7; 8; 13; 14
5	5; 6	3; 8; 9; 11; 12; 14	2; 4; 9	3; 5; 6; 11; 12; 13
6	1; 6; 7; 10; 13	8; 12; 14	2; 3; 10; 13	4; 6; 8; 9
7	4; 5; 9	1; 6; 14	1; 3; 5; 10; 12	6; 13
8	;	1; 4; 5; 9; 11; 13	4; 6; 9	1; 5; 11; 12
9	1; 4; 6	2; 3; 8; 12	3; 6; 8; 9; 11	5; 7; 14
10	1; 6; 9; 11; 13	7; 8; 12; 14	4; 5; 6	9; 10; 12; 14
11	3; 5; 8	1; 4; 13; 14	5; 7; 8; 9; 13	1; 3; 10; 12; 14
12	2; 3; 8; 9; 11	4; 7; 10; 13; 14	1; 3; 6	4; 9; 10; 11; 13; 14
13	3; 12	4; 5; 6; 7; 8	1; 3; 9; 11	4; 6; 7; 12
14	2; 6; 7	4; 9; 10; 12	1; 8	2; 3; 4; 6; 7; 10

Fonte: O Autor (2021).

No que tange ao desempenho do sistema, as estratégias de disponibilização integral e parcelada do orçamento de manutenção ocupam, em média, 55% e 60% da janela de manutenção. Em termos de custo, a estratégia de disponibilização integral do orçamento também é ligeiramente mais eficaz que a disponibilização parcelada, consumindo, respectivamente, 1359 e 1429 unidades monetárias.

Além disso, ambas as soluções cumprem a meta orçamentária, o que indica que os planos de manutenção obtidos representam boas soluções para o problema integrado de planejamento. Parte da efetividade dessas soluções se deve ao planejamento frequente de ações imperfeitas, consideradas uma estratégia eficiente para a redução de custos e do tempo de manutenção (YEH, LO e YU, 2011). Isso ainda reduz a pegada ambiental da organização (LO e YU, 2013). Para maiores discussões a esse respeito, recomenda-se a leitura de Santos, Cavalcante e Ribeiro (2021).

Adicionalmente, compara-se a expectativa de confiabilidade do gerente de manutenção à confiabilidade esperada para o sistema ao longo do horizonte de planejamento para as estratégias orçamentárias analisadas (Tabela 5). Deve-se observar que, em alguns momentos, ocorre o aumento da confiabilidade do sistema. Isso se dá em virtude da execução das ações preventivas perfeitas.

Tabela 5 - Comparação entre os níveis aspirados e esperados de confiabilidade do sistema ao longo do horizonte de planejamento para as estratégias orçamentárias P1 e P2

M	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R@(m+1)	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Confiabilidade_P1	0.94	0.92	0.90	0.93	0.89	0.93	0.96	0.83	0.92	0.91	0.85	0.86	0.92	0.84
Confiabilidade_P2	0.94	0.90	0.87	0.91	0.89	0.96	0.96	0.91	0.94	0.93	0.88	0.87	0.93	0.83

Fonte: O Autor (2021)

No geral, apesar da disponibilização integral do orçamento fornece mais poder de decisão que a disponibilização parcelada, ambas as estratégias apresentam desempenho similar do sistema. Dessa forma, a disponibilização parcelada do orçamento é uma alternativa interessante para esse sistema, uma vez que os investimentos podem ser feitos em outras funções organizacionais, conforme destacado anteriormente.

3.6 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

Após discutir algumas das contribuições deste capítulo na seção anterior, modificam-se as suposições dos modelos, com o intuito de ampliar essa percepção. Por razões práticas, apenas o segundo modelo (P2) é explorado nesta seção; para isso, consideram-se dois cenários. No primeiro cenário, investiga-se como os fatores humanos e as condições de operação do sistema impactam nos planos de manutenção, três casos são analisados:

- P2A – as condições de operação do sistema permanecem heterogêneas, mas a qualidade das intervenções imperfeitas é fixada no valor modal $mod(\theta_e(1))$;
- P2B – os fatores humanos influenciam a qualidade das intervenções, mas condições de operação do sistema são homogêneas, $s(m) = 1, (m = 1; \dots; M)$;
- P2C – nem os fatores humanos nem as condições de operação interferem na manutenção, isto é $\theta_e(1) = mod(\theta_e(1))$ e $s(m) = 1, (m = 1; \dots; M)$; o que corresponde à abordagem tradicionalmente empregada na literatura.

A Tabela 6 apresenta os planos de manutenção para os casos base e perturbados do cenário I.

Tabela 6 - Planos de manutenção para os casos do cenário I

Parada	P2		P2A		P2B		P2C	
	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas
1	2; 9	3; 4; 6; 7; 8; 13	3; 6; 13	1; 10	3; 5; 6; 7; 11	2; 8; 12; 13	(vazio)	1; 5; 6; 11; 12; 14
2	11; 12; 13	8	3; 5	1; 2; 3; 4; 6; 9; 12; 13	3; 5; 6; 10	8; 12	2; 13	5; 7; 9; 12
3	2; 5; 8	6; 10; 13	5; 8; 13	1; 4; 9; 10; 12; 14	7; 9	5; 6; 12; 13	1; 4; 10; 14	2; 3; 9; 12
4	1; 2; 6; 9	4; 7; 8; 13; 14	4	1; 5; 6; 8; 9; 10; 13	2; 5; 8; 9; 10	1; 4; 6; 7; 11	4; 6; 9; 10; 11	1; 2; 3; 7; 12
5	2; 4; 9	3; 5; 6; 11; 12; 13	2; 11; 13	9; 10	3	1; 2; 4; 6; 10; 14	7	1; 6; 14
6	2; 3; 10; 13	4; 6; 8; 9	9; 10; 13	1; 4; 6; 8; 12; 14	2; 3; 4; 6; 9; 10; 11	1; 11	7; 13	2; 3; 5; 9
7	1; 3; 5; 10; 12	6; 13	3	1; 5; 6; 10; 12; 13	3; 8; 11	5; 7; 9; 10; 12	1; 3; 4; 5; 10	6; 9; 11; 14
8	4; 6; 9	1; 5; 11; 12	4; 10; 14	1; 2; 9; 11	2; 11; 14	3; 4; 5; 8; 10; 12	1; 2; 3	5; 11
9	3; 6; 8; 9; 11	5; 7; 14	3; 5	4; 6; 10; 11; 12	1; 13	2; 5; 9	3; 4	2; 6; 7; 9; 10
10	4; 5; 6	9; 10; 12; 14	1; 4; 5; 6; 11	2; 3; 8	3; 4; 7; 10; 12	1; 6; 8; 11; 13	3; 13	2; 5
11	5; 7; 8; 9; 13	1; 3; 10; 12; 14	8; 14	2; 4; 6; 9; 10	1; 6; 13	4; 8; 11; 14	12	4; 6; 10; 11; 14
12	1; 3; 6	4; 9; 10; 11; 13; 14	10; 12; 13	2; 6	2; 3; 11; 13	4; 5; 9; 14	1; 4; 7; 9; 14	6; 8; 10
13	1; 3; 9; 11	4; 6; 7; 12	6	4; 5; 9; 10; 12; 13; 14	3; 4; 5; 6	9; 11; 13	1; 4; 6; 12	5; 8; 10
14	1; 8	2; 3; 4; 6; 7; 10	6; 9	1; 3; 4; 5; 10; 12	3; 6	2; 5; 7; 9; 10; 11; 13	5; 10; 13	1; 2; 4; 6; 7; 8; 9; 11; 14

Fonte: O Autor (2021).

Destaca-se que os planos de manutenção P2A e P2C contêm menos ações perfeitas que o caso base P2. Esse resultado sugere que, em cenários sem possibilidade de erro humano, menos se recorre às ações perfeitas. Isso impacta diretamente a duração e o custo da manutenção, já que as substituições são mais caras e duram mais tempo. Por outro lado, isso pode iludir os

gestores de manutenção quanto ao consumo dos recursos organizacionais e leva-los à utilização de modelos pouco realistas.

Adicionalmente, investiga-se o impacto da utilização de estratégias orçamentárias alternativas no planejamento da manutenção. Nesse sentido, três estratégias são analisadas:

- P2D – o orçamento de manutenção é disponibilizado proporcionalmente à duração e severidade da operação. A motivação desta estratégia é disponibilizar o orçamento de forma proporcional ao esforço operacional;
- P2E – o orçamento de manutenção é liberado em parcelas seguindo uma progressão aritmética, cujo primeiro termo é de 96 e o incremento é 2 unidades monetárias. A ideia por trás dessa estratégia é liberar mais dinheiro à medida que o sistema desgasta;
- P2F – o orçamento de manutenção é liberado em parcelas seguindo uma progressão aritmética, cujo primeiro termo é 124 e o incremento é de -2 unidades monetárias. Esta estratégia é simétrica à anterior e visa aumentar o poder de decisão.

A Tabela 7 apresenta os planos de manutenção para os casos base e perturbados do cenário II. Alguns pontos devem ser destacados:

- Quando se compara os casos P2 e P2D, observa-se que a estratégia de solução do problema sugere planos de manutenção com quantidades semelhantes de ações perfeitas e imperfeitas. Isso se dá pelas condições pouco heterogêneas de operação do sistema, que implicaram na liberação semelhante do orçamento de manutenção;
- Padrões de intervenção distintos são observados para os casos P2E e P2F. Enquanto intervenções imperfeitas são mais comuns no primeiro, substituições preventivas são mais frequentes no outro. Esse resultado está diretamente relacionado ao poder de decisão proporcionado pelas estratégias orçamentárias;
- O desempenho do sistema, em termos de disponibilidade e custos, não foi afetado pelas estratégias orçamentárias. Assim, a organização tem liberdade de escolha entre as estratégias orçamentárias analisadas. Esse resultado atesta a adequação da estratégia de solução no que se refere ao provimento de bons planos de manutenção.

Tabela 7 - Planos de manutenção para os casos do cenário II

Parada	P2		P2D		P2E		P2F	
	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas	Ações Perfeitas	Ações Imperfeitas
1	2; 9	3; 4; 6; 7; 8; 13	3; 4; 9; 10	1; 6; 14	1; 2; 9	12; 13; 14	3; 4; 10; 13	1; 2; 5; 8; 9; 11; 12
2	11; 12; 13	8	2; 7; 9; 10	3; 6; 8; 13; 14	(vazio)	3; 5; 7; 11; 12; 14	7; 9	2; 3; 11
3	2; 5; 8	6; 10; 13	3; 6; 9	2; 4; 5; 7; 13; 14	3; 5; 8; 9	1; 6; 11; 12	2; 9; 11; 13	3; 5; 6; 7; 10; 12
4	1; 2; 6; 9	4; 7; 8; 13; 14	5	1; 6; 7; 12	1; 4; 10; 12	2; 3; 7; 8; 9; 11	10	5; 14
5	2; 4; 9	3; 5; 6; 11; 12; 13	2; 5; 10	7; 8	6	1; 2; 4; 7; 9; 10; 12; 13	2; 4; 7; 10 11; 14	3; 12
6	2; 3; 10; 13	4; 6; 8; 9	3; 12	6; 7; 9; 10; 11; 14	(vazio)	2; 4; 6; 9; 10; 11; 12	1; 3; 7; 11	4; 6; 10; 13
7	1; 3; 5; 10; 12	6; 13	6	2; 5; 10; 13; 14	2; 10; 12; 13	3; 4; 5; 6; 7; 11	3; 6; 12	8; 9; 10; 11; 13; 14
8	4; 6; 9	1; 5; 11; 12	1; 3; 5; 7; 11	6; 8; 10; 13	3; 6; 11	1; 4; 5; 7; 9; 10; 13	1; 4; 5; 6; 7; 3	2; 9; 11; 12
9	3; 6; 8; 9; 11	5; 7; 14	3; 4	6; 7; 8; 10; 12; 13; 14	6	1; 4; 7; 8; 10	2; 3	1; 5; 10
10	4; 5; 6	9; 10; 12; 14	4; 5; 6; 9; 14	1; 2; 7; 8; 10; 12; 13	3	4; 6; 7; 11; 14	1; 12	6; 7; 10; 11; 13; 14
11	5; 7; 8; 9; 13	1; 3; 10; 12; 14	2; 4; 7; 10; 12	1; 13; 14	1; 5	4; 6; 8; 9; 10; 12	1; 5; 8; 13; 14	4; 7; 12
12	1; 3; 6	4; 9; 10; 11; 13; 14	2; 3; 8; 11; 13	5; 12	1; 8; 12	2; 3; 5; 6; 10; 13	2; 3; 9	4; 12
13	1; 3; 9; 11	4; 6; 7; 12	1; 7; 14	4; 9; 10	3; 4; 8; 11; 14	1; 6; 7; 9; 10; 13	8; 9; 10; 14	4; 5; 6; 13
14	1; 8	2; 3; 4; 6; 7; 10	1; 4	2; 4; 9; 10; 11; 12; 13; 14	2; 4; 10; 12	1; 3; 5; 6; 9; 11; 14	2; 5; 9; 10	3; 6; 12

Fonte: O Autor (2021).

3.7 CONCLUSÕES

Embora o bom desempenho das organizações dependa de um planejamento efetivo da manutenção dos sistemas produtivos, nem sempre se dedica a devida atenção aos modelos

matemáticos elaborados para este fim. Nesse sentido, é comum que esses modelos negligenciem a dinâmica operacional e as restrições dos recursos de manutenção. Os modelos de Manutenção Seletiva se propõem a resolver tais questões.

Este capítulo explorou essa categoria de modelos, especialmente no contexto dos sistemas orientados a múltiplas operações. Nesse sentido, foi proposto um indicador para mensurar o grau de severidade de cada uma dessas operações, que relaciona as condições projetadas pelo fabricante e as experimentadas pelas organizações; isso modela melhor o desgaste dos componentes do sistema. É interessante observar que o grau de severidade da operação tem efeito na idade virtual do componente, ao passo que a idade real e os parâmetros da distribuição Weibull não são impactados. Além disso, foi proposta uma forma intuitiva para modelar a qualidade das ações imperfeitas.

Ainda, mostrou-se que a execução de níveis imperfeitos de manutenção promove o uso efetivo do orçamento de manutenção. Esse fato é importante quando da definição de uma estratégia orçamentária; problema igualmente desprezado na literatura, mas que recebeu atenção neste capítulo. Nesse sentido, constatou-se que a disponibilização do orçamento de manutenção em parcelas ao longo do horizonte de planejamento é uma estratégia interessante para organizações de diferentes tamanhos, a despeito da disponibilização integral desse orçamento promover maior poder de decisão.

4 MODELOS DE MANUTENÇÃO INTEGRADOS - DECISÕES DE CURTO E LONGO PRAZOS

Neste capítulo, desenvolvem-se modelos para o planejamento de manutenção a curto e longo prazos. A ênfase do modelo de curto prazo está no consumo eficiente dos recursos financeiros e temporais. Para isso, consideram-se a dependência econômica positiva entre os componentes do sistema e o uso do nível imperfeito de manutenção preventiva como promotor de eficiência financeira e ambiental. Também são propostos um modelo para a qualidade dessa categoria de ações - visando maior aderência à realidade - e um indicador de desempenho do sistema – objetivando um bom desempenho a longo prazo. O modelo de longo prazo considera um limite para o número de intervenções imperfeitas por componente e auxilia o gestor quanto a expectativa de confiabilidade para o sistema. Algumas contribuições deste capítulo podem ser encontradas em Santos, Cavalcante e Ribeiro (2021).

4.1 INTRODUÇÃO

As atividades de manutenção visam restaurar e/ou melhorar a condição de operação de um sistema (SWANSON, 2001). No passado, era costume das organizações intervirem nos sistemas somente quando falhavam, contudo, isso acarretava altos custos para as organizações (ALSYOUF, 2007). Quando isto foi percebido, passou-se a planejar paradas para manutenção, a fim de que essas falhas fossem evitadas (CHUNG *et al.*, 2009). Sistemas orientados a missões ilustram bem esse fato, dado que entre duas fases consecutivas de operação, planeja-se uma janela de tempo para execução das atividades de manutenção.

Nesse contexto, é comum encontrar modelos para planejamento da manutenção que consideram que a manutenção tem duração desprezível em relação à operação (CASSADY, POHL E MURDOCK, 2001b). Outros modelos, não só consideram a duração da janela de manutenção, mas também levam em conta a existência de restrições nos recursos, que limitam o conjunto de ações que podem ser executadas (MAILLART *et al.*, 2009). Os modelos de Manutenção Seletiva, cuja finalidade é recomendar um plano de manutenção objetivando a utilização eficiente dos recursos, enquadram-se nessa descrição.

No que tange ao uso eficiente dos recursos de manutenção, Maaroufi, Chelbi e Rezg (2013) apontam que há economia nos custos de *setup* quando componentes são mantidos em grupo dentro da janela de manutenção. Esta perspectiva é ampliada por Dao, Zuo e Pandey

(2014), que também consideram que a manutenção em grupo implica economia de tempo. Xu *et al.* (2016) estratificaram essas economias em nível de sistema, subsistema e entre subsistemas.

Uma abordagem alternativa para o melhor aproveitamento dos recursos de manutenção é a disponibilização de diferentes níveis de manutenção. Nesta perspectiva, enquanto o modelo de Manutenção Seletiva proposto por Rice, Cassady e Nachlas (1998) contempla apenas substituições corretivas, Cassady, Pohl e Murdock (2001a) também admitem substituições preventivas e ações de reparo mínimo.

Visando um menor consumo de recursos, modelos posteriores adotaram níveis imperfeitos de manutenção (CAO *et al.*, 2018). Essa categoria de ações é apontada por Yeh, Lo e Yu (2011), Lo e Yu (2013) e Santos, Cavalcante e Ribeiro (2021) como uma estratégia eficiente para reduzir custos e promover sustentabilidade. Nesse contexto, a modelagem da qualidade das intervenções imperfeitas de manutenção é uma preocupação constante, sendo comum modelá-la pela abordagem da idade virtual dos componentes (LIU e HUANG, 2010; MAAROUFI, CHELBI e REZG, 2013; e DUAN *et al.*, 2018).

Nesse sentido, Liu e Huang (2010) e Maaroufi, Chelbi e Rezg (2013) relacionam a qualidade da manutenção ao custo da ação. Khatab e Aghezzaf (2016) utilizam uma distribuição de probabilidades para vincular a qualidade da intervenção à perícia do mantenedor. Khatab *et al.* (2017) e Duan *et al.* (2018) integram ambas as propostas. Pandey *et al.* (2013), por sua vez, consideram que tanto o custo da ação quanto a idade do componente influenciam na qualidade.

No panorama geral, Lie e Chun (1986), Mettas (2000) e Liu e Huang (2010) corroboram com a assertiva anterior e destacam tais fatores como os mais influentes para a qualidade dessa ação. Do *et al.* (2013) acrescentam que o número de intervenções imperfeitas acumulado desde a substituição do componente também influencia na qualidade. Este capítulo propõe um modelo para a qualidade da ação que leve em conta esses três fatores.

A despeito dos níveis imperfeitos de manutenção favorecerem um melhor uso de recursos, não se pode negligenciar que razões técnicas ou econômicas impem que esta categoria de intervenção seja executada indefinidamente nos componentes do sistema (DO e BERENGUER 2012; e SANTOS, CAVALCANTE e RIBEIRO, 2021). Contudo, essa ponderação não foi observada nos modelos de Manutenção Seletiva reportados na literatura. Em virtude disso, este capítulo propõe um modelo de planejamento estratégico (longo prazo)

de manutenção cuja finalidade é balizar um modelo de planejamento operacional de Manutenção Seletiva (curto prazo).

É comum mensurar o desempenho dos sistemas a curto prazo em termos da confiabilidade após a manutenção ou do custo de manutenção (CAO *et al.*, 2018). No entanto, acredita-se que uma combinação de ambos os indicadores seja uma métrica mais adequada, pois o uso isolado de um desses indicadores pode prejudicar o desempenho do sistema a longo prazo.

Em suma, propõe-se um modelo para o planejamento de manutenção a curto prazo, que lida com o problema da Manutenção Seletiva, trazendo contribuições relacionadas à modelagem da qualidade das ações e à métrica para o desempenho do sistema. Em complemento, propõe-se um modelo para o planejamento de manutenção a longo prazo, que baliza as decisões do modelo anterior. Os modelos são integrados, de forma que o planejamento a curto prazo pressupõe a resolução simultânea do problema a longo prazo. Para isso, combinou-se as técnicas de Algoritmos Genéticos, para reduzir o espaço de busca das soluções e Simulação de Eventos Discretos, para simular a evolução do sistema ao longo do horizonte de planejamento.

4.2 MODELAGEM

Nesta seção, formulam-se os modelos de planejamento da manutenção a curto e longo prazos, bem como o modelo para a qualidade das intervenções de manutenção.

4.2.1 Descrição da dinâmica de operação e manutenção do sistema

Considere um sistema composto por E componentes. A operação desse sistema se dá em períodos de duração fixa, denotada D . Nesses períodos, os componentes do sistema desgastam e podem vir a falhar. O comportamento de falha de um dado componente e ($e = 1, \dots, E$) é descrito por uma distribuição Weibull com parâmetro de forma $\beta_e, \beta_e > 1$ e parâmetro de escala $\eta_e, \eta_e > 0$, estimados através do histórico de falhas do componente. A taxa de falha do componente e , denotada $h_e(t)$, é expressa pela Equação 1 [$h_e(t) = \frac{\beta_e}{\eta_e} (\frac{t}{\eta_e})^{\beta_e-1}$].

A falha do componente e é restrita ao período de operação, observável e auto anunciada, de forma que, após o período de operação, o componente possa se encontrar no estado operacional ou falho. A variável de estado X_e^- registra essa informação:

$$X_e^- = \begin{cases} 1, & \text{se o componente } e \text{ está operacional após a operação do sistema,} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Após a operação, o sistema fica disponível para manutenção por uma janela limitada de tempo, denotada U , inerente ao planejamento de operações. A manutenção é executada caso a confiabilidade do sistema esteja abaixo do nível r_R , que corresponde a um requisito de confiabilidade para retomada da operação do sistema.

Para cada componente e , três níveis de manutenção são considerados: 1. ação preventiva imperfeita; e 2. substituição preventiva, caso o componente esteja no estado operacional após o período de operação ($X_e^- = 1$); e 3. substituição corretiva, caso o componente esteja no estado falho após o período de operação ($X_e^- = 0$). Se a substituição corretiva for executada, o estado do componente, após a manutenção, é restaurado para operacional. A variável de estado X_e^+ identifica o estado do componente e após a manutenção:

$$X_e^+ = \begin{cases} 1, & \text{se o componente } e \text{ está operacional após a manutenção do sistema,} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Além disso, tanto a substituição corretiva quanto a substituição preventiva restauram a condição do componente para 'tão bom quanto novo', ao passo que a ação preventiva imperfeita restaura a condição do componente para uma condição intermediária entre 'tão bom quanto novo' e 'tão ruim quanto antes'.

No presente capítulo, este efeito é descrito por um modelo da redução da idade (KIJIMA, MORIMURA e SUZUKI, 1998). Nesta abordagem, a idade real do componente corresponde ao tempo acumulado de operação do componente e a idade virtual do componente corresponde ao tempo aparente de operação do componente. Assim, tanto a idade real quanto a idade virtual do componente são zeradas, caso ele seja substituído e apenas a idade virtual é reduzida, caso uma ação imperfeita seja executada.

As idades real e virtual do componente e , antes e depois da janela de manutenção, são identificadas, respectivamente, pelas variáveis, Ac_e^- , Ac_e^+ , A_e^- e A_e^+ , tal que:

- $Ac_e^+ = Ac_e^-$ e $A_e^+ = A_e^-$ se o componente e não for assistido;
- $Ac_e^+ = Ac_e^-$, $Ac_e^+ > A_e^+$ e $A_e^- > A_e^+ > 0$, se o componente e for mantido de forma imperfeita. A posição de A_e^+ no intervalo $[0; A_e^-]$ depende da qualidade da ação e será detalhada no próximo tópico;
- $Ac_e^+ = A_e^+ = 0$, se o componente e for substituído;

- Se $X_e^- = 1$, $A_e^- (Ac_e^-)$ corresponde à idade virtual (real) do componente e no início do período de operação precedente acrescida do tempo de operação D , ou seja, a idade virtual (real) do componente e cresce linearmente à medida que o sistema opera;
- Se $X_e^- = 0$, $A_e^- (Ac_e^-)$ apresentará um valor intermediário entre a idade virtual (real) do componente e no início do período de operação precedente e desse valor acrescido do tempo D , dado que o aumento da idade virtual (real) do componente e cessa, caso o componente falhe.

Além do estado do componente ao final do período de operação, a decisão quanto ao nível da ação a ser executada deve levar em conta que fatores técnicos e/ou econômicos inviabilizam a sucessiva execução de intervenções imperfeitas nesse componente (DO e BERENGUER, 2012; e SANTOS, CAVALCANTE e RIBEIRO, 2021). A determinação de um limite para o número de intervenções imperfeitas que podem ser executadas no componente, entretanto, é um problema de manutenção que tem recebido pouca atenção da literatura, conforme destacam Azevedo *et al.* (2015) e Azevedo *et al.* (2020). Negligenciá-lo, contudo, pode implicar em políticas de manutenção inadequadas.

Assim, este capítulo propõe uma abordagem para lidar com esse problema. Com fins de modelagem, o limite para o número de intervenções imperfeitas é identificado pela variável de decisão inteira n_e , ao passo que o número acumulado de intervenções imperfeitas desde a última substituição do componente e , antes e após a janela de manutenção, são expressos, respectivamente, pelas variáveis inteiras n_e^- e n_e^+ , tal que:

- $n_e^+ = n_e^-$, se o componente e não for assistido;
- $n_e^+ = n_e^- + 1$, se o componente e for mantido de forma imperfeita. Este nível de ação é elegível se e somente se $n_e^- < n_e$;
- $n_e^+ = 0$, se o componente e for substituído.

Ademais, deve-se esperar que n_e ($e = 1, \dots, E$) varie em função do requisito de confiabilidade para retomada da operação do sistema, r_R (ANITYASARI, KASEBERNICK, e KARA, 2007). Assim, quando este requisito é alto, a expectativa é que se aumente a frequência das substituições preventivas o que reduz o número limite de substituições imperfeitas.

Nesse contexto, os modelos de manutenção seletiva reportados na literatura assumem que o valor r_R é arbitrado por um gestor (CAO *et al.*, 2018); assim, a adoção de um valor inadequado

pode implicar que a política de manutenção não seja sustentável a longo prazo. Neste capítulo, ao invés de assumir r_R como um parâmetro, ele será tratado como uma variável de decisão, e determinado em conjunto com n_e . Ambas as decisões caracterizam um problema de planejamento estratégico da manutenção, relacionado ao ciclo de vida do sistema, e pressupõe uma sequência de M períodos de operação (e manutenção), onde M é o número esperado de operações do sistema antes dele ser renovado.

No curto prazo, não apenas o requisito de confiabilidade para retomada da operação do sistema precisa ser satisfeito, mas também a duração limitada U da janela de manutenção deve ser observada, dado que restringe o conjunto de ações passíveis de execução. Logo, deve-se determinar um conjunto de componentes a serem mantidos e os níveis de manutenção a serem executados, de forma a satisfazer ambas as restrições. Isso caracteriza um problema de planejamento da manutenção em nível de operação, e também será tratado neste capítulo. Esse problema está associado ao problema de planejamento estratégico da manutenção, de forma que se propõe uma abordagem integrada para suas resoluções.

Além de consumir recursos de tempo, a realização de uma ação de manutenção consome recursos monetários da organização. Em geral, a ação preventiva imperfeita consome menos tempo e dinheiro que a perfeita; e a substituição preventiva é mais barata que a corretiva. Neste capítulo, o custo de execução do nível de manutenção l_e no componente e , denotado $C_e(l_e)$, pode ser estratificado em duas parcelas ($C_e(l_e) = c_e(l_e) + S_e(G)$):

- O custo fixo $c_e(l_e)$, que depende das características do componente e e do nível da ação l_e a ser executado;
- O custo de *setup*, denotado $S_e(G)$, que representa os custos logísticos (ou custos de preparação). Assume-se que este custo seja independente do nível da ação a ser executado, mas varie em função do conjunto de componentes, denotado por G , a serem mantidos na janela de manutenção. Isso acontece em virtude de dependência econômica positiva entre os componentes do grupo, de forma que a manutenção do grupo de componentes é mais barata que a manutenção individual dos componentes do grupo (MAAROUFI, CHELBI e REZG, 2013). Em detalhes, $S_e(G) = S_e^0 - \Delta S_G$, onde S_e^0 é o custo nominal de preparação do componente e , e ΔS_G é a economia atribuída à preparação do conjunto de componentes e rateada entre os elementos desse conjunto. Se apenas o componente e for mantido durante a janela de manutenção, então $\Delta S_G = 0$, $S_e(G) = S_e^0$.

Ademais, caso a falha de um componente implique na falha do sistema, diz-se que a operação foi mal-sucedida. Nesse cenário, incorre-se em um custo de falha, denotado c_f , para minimizar os efeitos desta falha.

De forma análoga, o tempo para execução do nível de manutenção l_e no componente e , denotado $T_e(l_e)$, consiste de duas partes ($T_e(l_e) = t_e(l_e) - \Delta T_G$):

- Um tempo específico $t_e(l_e)$, dependente do componente e e do nível da ação a ser executado;
- Uma economia de tempo, denotada ΔT_G , atribuída à manutenção conjunta do grupo de componentes e rateada entre os elementos do grupo. Se apenas o componente e for mantido, então $\Delta T_G = 0$.

Para fins de modelagem, o nível de manutenção $l_e = 3$ representa uma substituição corretiva; $l_e = 2$ representa uma substituição preventiva; $l_e = 1$ representa uma ação preventiva imperfeita. Além disso, a não manutenção do componente e é representada pelo nível $l_e = 0$.

A fim de discriminar o custo e o tempo decorrentes de um plano de manutenção, define-se a seguinte variável de decisão:

$$z_e(l_e) = \begin{cases} 1, & \text{se o nível de manutenção } l_e \text{ for alocado ao componente } e \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Assim, o custo e o tempo de manutenção do sistema durante a janela de manutenção são computados, respectivamente, como:

$$C_S = \sum_{e=1}^E \sum_{l_e=0}^3 (c_e(l_e) + S_e(G)) * z_e(l_e) \quad (\text{Equação 15})$$

$$T_S = \sum_{e=1}^E \sum_{l_e=0}^3 (t_e(l_e) - \Delta T_G) * z_e(l_e) \quad (\text{Equação 16})$$

Reitera-se que o nível de manutenção $l_e = 0$ não implica, diretamente, custo ou gasto de tempo. Além disso, essas equações contemplam o custo e o tempo gastos com ações preventivas ($l_e = 1$ e $l_e = 2$) e corretivas ($l_e = 3$), sendo possível estratificá-los.

4.2.2 Modelo para a qualidade das ações

Conforme anunciado, a execução de uma ação de manutenção em um dado componente e reduz sua idade virtual. A magnitude dessa redução é uma função do fator de redução da idade

vinculado ao nível de ação l_e executado, denominado $\theta_e(l_e)$. A idade virtual do componente após o período de manutenção é dada pela equação:

$$A_e^+ = [1 - \theta_e(l_e)] * A_e^- \quad (\text{Equação 17})$$

Particularmente, o fator de redução de idade é unitário quando o componente é substituído ($\theta_e(3) = \theta_e(2) = 1$), tal que $A_e^+ = 0$. Se uma ação preventiva imperfeita for executada, o fator de redução de idade recai sobre o intervalo $[0,1]$, tal que $A_e^- \geq A_e^+ \geq 0$. Se $\theta_e(1) = 0$, a idade do componente não é afetada pela ação, e sua condição de operação permanece `tão ruim quanto antes`. Se $\theta_e(1) = 1$, a idade do componente é resetada para zero, e sua condição de operação se torna `tão bom quanto novo`. Nesse caso a ação imperfeita corresponde à realização de uma substituição preventiva. O mais comum é que $0 < \theta_e(1) < 1$ e a condição do componente seja intermediária entre `tão bom quanto novo` e `tão ruim quanto antes` (DO *et al.*, 2013).

Nesse sentido, a literatura reporta várias formas de modelar a qualidade das ações imperfeitas. Liu e Huang (2010) e Maaroufi, Chelbi e Rezg (2013) consideram que o capital empenhado na manutenção é diretamente proporcional à qualidade da ação. Duan *et al.* (2018) adotam essa perspectiva ao considerarem que uma ação de maior qualidade implica em custos mais próximos ao custo de substituição preventiva do componente.

Lie e Chun (1986), Mettas (2000) e Liu e Huang (2010) também apontam o custo da ação como um dos fatores mais relacionados a sua qualidade. Esses autores ainda apontam que a idade do componente é outro fator chave para a qualidade da ação; tal que, quando o componente envelhece, a ação imperfeita não surte grandes efeitos, independente do custo da ação. Isso é levado em conta nos modelos propostos por Pandey *et al.* (2013), Khatab e Aghezzaf (2016), Khatab *et al.* (2017) e Santos, Cavalcante e Ribeiro (2021).

Além disso, Do *et al.* (2013) ponderam que a qualidade da ação imperfeita também está relacionada ao número acumulado de intervenções imperfeitas desde a substituição do componente; tal que, quanto maior o número acumulado, menor o efeito da ação no componente.

Inspirada no modelo proposto por Do *et al.* (2013), esta seção desenvolve um modelo para a qualidade das ações imperfeitas, tal que o fator de redução da idade $\theta_e(1)$ depende de:

- a idade virtual do componente antes da janela de manutenção, Ac_e^- ;
- o número acumulado de intervenções imperfeitas no componente, n_e^- .

- A razão entre o capital empenhado na execução da ação imperfeita, (desconsiderando-se o custo de *setup*) e a parcela fixa do custo da substituição preventiva, $c_e(1) / c_e(2)$;

A fim de preservar os efeitos, anteriormente descritos, desses fatores para a qualidade das ações imperfeitas, propõe-se que o valor instantâneo do fator de redução da idade seja dado por:

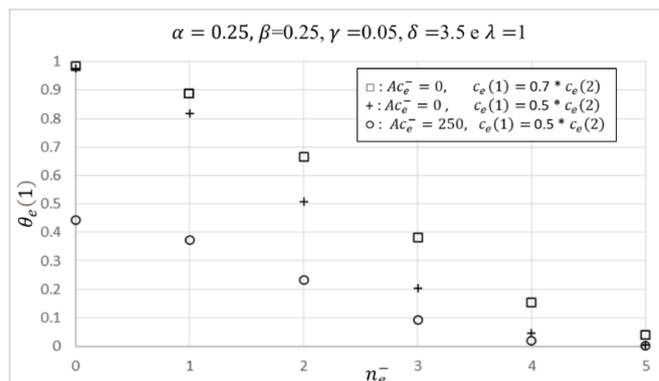
$$\theta_e(1) = 1 - \exp \{ -[\alpha \cdot (Ac_e^-)^\beta + \gamma \cdot (n_e^- + 1)^\delta] \cdot [1 - \lambda \cdot (c_e(1) / c_e(2))] \} \quad (\text{Equação 18})$$

onde α , β , γ , δ e λ são números reais positivos. De acordo com este modelo, verifica-se que:

- O fator de redução da idade é proporcional à razão entre os custos fixos de manutenção preventiva imperfeita e perfeita. Essa propriedade pode ser constatada na Figura 9 quando se observam as funções representadas pelos marcadores ‘□’ e ‘+’, para um mesmo número acumulado de intervenções imperfeitas no componente;
- Quanto maior a idade real do componente, menor a redução da idade virtual do componente após a manutenção imperfeita. Essa propriedade é observada na Figura 9 quando se comparam as funções representadas pelos marcadores ‘+’ e ‘○’, para um mesmo número acumulado de intervenções imperfeitas no componente;
- O fator de redução da idade decresce com o aumento do número de intervenções imperfeitas no componente. Essa propriedade é vista na Figura 9, dado que as funções plotadas são decrescentes.

Convém destacar que a quantidade ideal de intervenções imperfeitas por componente leva em consideração tanto aspectos técnicos quanto econômicos, de forma que as questões econômicas podem implicar em um limiar para a substituição do componente abaixo do valor indicado por razões técnicas (DO E BERENGUER, 2012).

Figura 9 - Propriedades do modelo proposto para a qualidade das ações imperfeitas



Fonte: O Autor (2021)

Uma vez que se pode determinar a qualidade de uma intervenção de manutenção, e sendo a falha de um componente não oculta, o estado e a idade virtual desse componente são conhecidos após o período de manutenção (e ao longo do período de operação) do sistema:

- A idade virtual de um componente é reduzida em função da qualidade do nível de manutenção executado e cresce proporcionalmente ao tempo de operação do sistema, sendo interrompida no caso de falha desse componente;
- O estado de operação do componente é modificado caso o componente falhe ou uma substituição corretiva seja executada.

Assim, a probabilidade condicional de que o componente e não falhe durante a próxima operação, antes do sistema ser assistido, denotada $R_e(D|A_e^-)$, depende da duração desse período, bem como da taxa de falha inerente ao componente, da idade virtual e do estado de operação do componente antes do período de manutenção, tal que:

$$R_e(D|A_e^-) = \frac{R_e(A_e^-+D)}{R_e(A_e^-)} * X_e^- = \exp\left(-\int_{A_e^-}^{(A_e^-+D)} h_e(t) dt\right) * X_e^- \quad (\text{Equação 19})$$

onde $R_e(\cdot)$ é a confiabilidade incondicional do componente e . A confiabilidade condicional do sistema, denotada R_S , é obtida a partir das confiabilidades condicionais dos E componentes e do diagrama de blocos para a confiabilidade do sistema. As confiabilidades condicionais após a manutenção do sistema são facilmente derivadas dessa equação.

4.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E DA ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Ao término de cada período de operação, avalia-se a confiabilidade condicional do sistema para o período de operação seguinte. Caso a confiabilidade condicional esteja acima do nível aspirado de confiabilidade r_R , retoma-se a operação sem que nenhuma ação de manutenção seja executada. Caso contrário, é necessário selecionar um conjunto de componentes para serem mantidos e especificar o nível de manutenção para cada componente selecionado. Para isso, deve-se levar em consideração as restrições técnicas e dos recursos de manutenção, que limitam as combinações viáveis de ações para o período de manutenção.

Nesse sentido, o requisito de confiabilidade do sistema para o período de operações subsequente veta as combinações que não elevam a confiabilidade condicional do sistema acima do nível aspirado r_R . Além disso, o número limite de intervenções imperfeitas por componente reduz a decisão relativa ao nível de manutenção preventiva às opções `não fazer

nada` ou `substituição preventiva`, caso se tenha atingido o limiar. Ressalta-se que r_R e n_e são parâmetros para as decisões de manutenção a nível de operação. Além disso, vetam-se os planos cuja duração exceda a janela de tempo destinada ao período de manutenção.

Uma vez determinado o espaço das combinações viáveis, escolhe-se o plano de manutenção que apresente um valor satisfatório para o indicador de curto prazo do desempenho do sistema. Para o sistema em discussão, o custo esperado de manutenção a longo prazo – que corresponde ao somatório dos custos esperados de manutenção ao longo do horizonte de planeamento - é um indicador adequado para mensurar o desempenho do sistema a nível de ciclo de vida. Contudo, utilizar esse indicador em nível de operação pode não ser sustentável, dado que a minimização do custo para a janela corrente de manutenção impacta negativamente na confiabilidade do sistema ao longo do horizonte de operações, o que pode elevar os custos. Assim, escolheu-se a razão entre o incremento da confiabilidade (após e antes da intervenção) e o custo de manutenção resultantes do plano de manutenção como indicador de performance em nível de operação.

Além do plano de manutenção para o período de manutenção corrente, este capítulo também se propõe a determinar valores satisfatórios para r_R e n_e , assumidos como parâmetros para o problema de decisão anterior, mas tratados como variáveis de decisão para o problema de planeamento estratégico da manutenção.

Para a determinação de n_e , o primeiro passo é fixar um valor para r_R . Depois, determina-se o espaço de busca para os valores dos limiares. Para isso, os valores indicados pelas restrições técnicas são utilizados como limites superiores para os números máximos de intervenções imperfeitas por componente. Em seguida, é calculado o custo médio esperado de longo prazo para cada solução viável, tal que cada observação desse custo requer a resolução de $M - 1$ problemas de planeamento operacional da manutenção. Isso é viabilizado pela Simulação dos Eventos ‘falha’ e ‘manutenção’ dos componentes do sistema ao longo do seu ciclo de vida. Espera-se que a variação do valor esperado convirja após um número grande de (N) observações. Assim, n_e pode ser determinado através da comparação dos valores médios do custo esperado a longo prazo de cada combinação viável de valores dos limiares.

Devido à característica combinatória desse problema, recorreu-se a metaheurística Algoritmos Genéticos para especificação das soluções candidatas a serem avaliadas. Nesse sentido, uma solução candidata (indivíduo) é representada por um vetor, que especifica os limiares para o número recomendado de intervenções imperfeitas por componente do sistema.

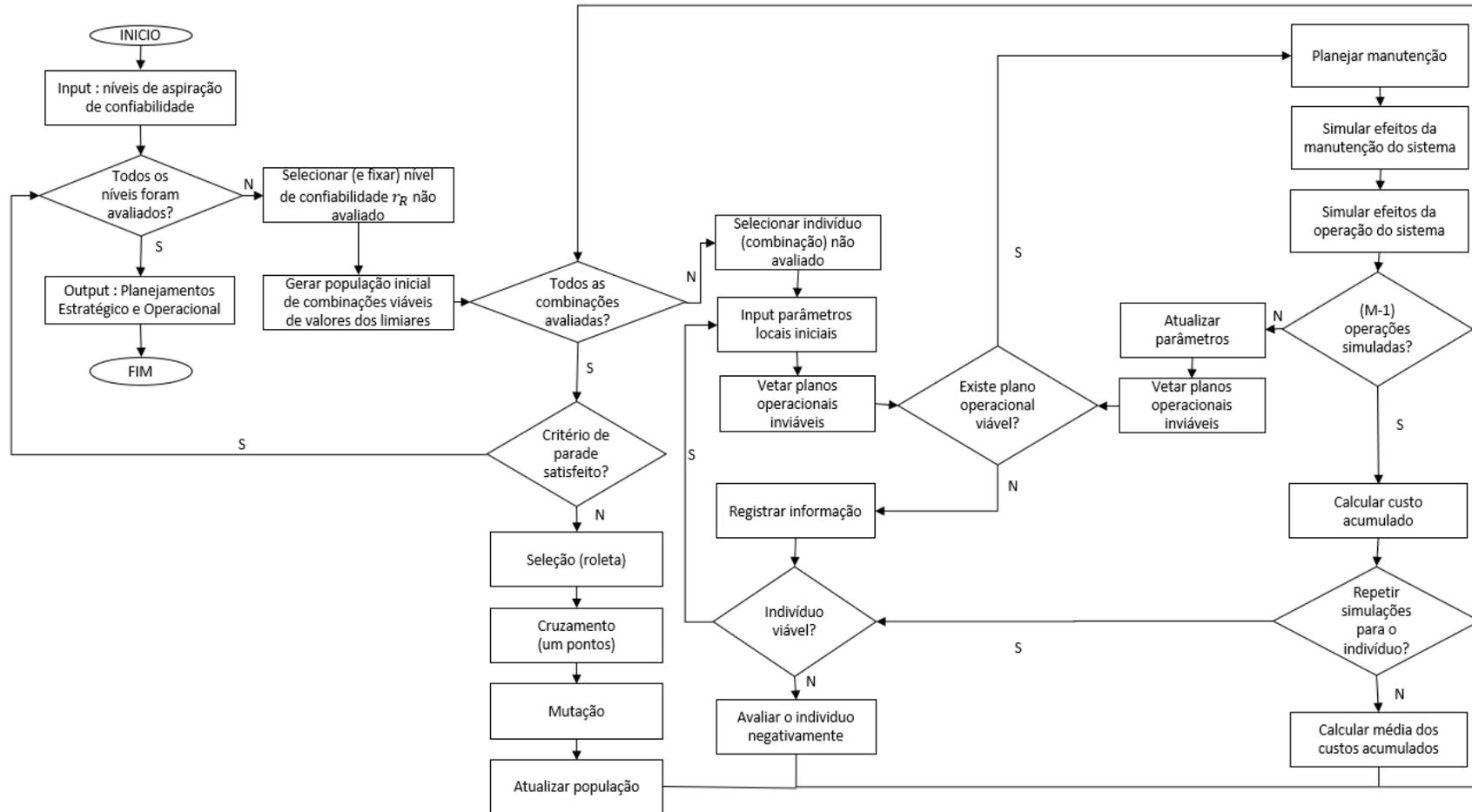
A população inicial, cuja quantidade de indivíduos é previamente definida, é obtida atribuindo-se valores aleatórios a cada célula do vetor (gene), respeitando-se a restrição técnica de cada componente. A descendência de cada geração resulta da aplicação dos operadores de seleção, cruzamento e mutação, tal que:

- Os pais da próxima geração são selecionados pela estratégia da roleta: atribui-se uma probabilidade de seleção a cada indivíduo na população proporcional ao desempenho relativo desse indivíduo em relação aos demais indivíduos na população. Em seguida, por meio da geração de números aleatórios, sorteia-se os indivíduos que serão pais da geração posterior (RAZALI e GERAGHTY, 2011). Destaca-se que um dado indivíduo pode ser selecionado mais de uma vez;
- A descendência da geração anterior é, então, obtida pelo intercâmbio de informações genéticas (limiares) dos indivíduos pais, acasalados segundo a ordem do sorteio. Para cada casal existe uma probabilidade de intercâmbio de informações genéticas previamente parametrizada. Por meio da geração de números aleatórios, é determinado se o casal deve trocar informações genéticas e em que célula do vetor deve ocorrer esta troca (estratégia de um ponto de corte). Evidentemente, os filhos são geneticamente iguais aos pais quando não há intercâmbio de informações genéticas;
- Para cada filho, atribui-se uma probabilidade de modificação das informações genéticas codificadas no vetor. Por meio da geração de números aleatórios, é determinado se cada informação genética do indivíduo será ou não modificada, respeitando-se a restrição técnica para cada componente.

Os indivíduos resultantes dessas operações, em conjunto com o melhor indivíduo da geração anterior, constituem a geração subsequente. Esse processo é repetido até que um número máximo de gerações seja atingido ou se o indivíduo com melhor desempenho na população permanecer o mesmo após um número predeterminado de gerações (critérios de parada do algoritmo). Ao final, o melhor indivíduo é recomendado.

Após essa etapa, pode-se avaliar outros valores de r_R e determinar, por comparação dos custos médios esperados a longo prazo, um valor adequado para o requisito de confiabilidade para a retomada da operação do sistema. Enfatiza-se que os problemas de planejamento da manutenção investigados neste capítulo são resolvidos de maneira simultânea, de forma que o algoritmo que integra as comparações, a metaheurística e as simulações é uma contribuição deste texto. A Figura 10 apresenta o fluxograma desse algoritmo. O pseudocódigo está descrito no Apêndice B.

Figura 10 – Fluxograma do Procedimento de Solução

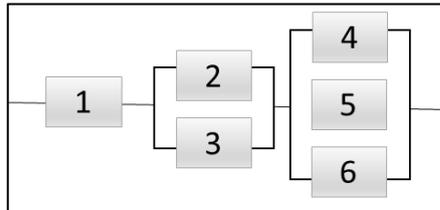


Fonte: O Autor (2021).

4.4 EXEMPLO NUMÉRICO

Utiliza-se um exemplo numérico para demonstrar a aplicabilidade do modelo. O sistema considerado consiste de $E = 6$ componentes dispostos no arranjo estrutural exibido na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama estrutural para o exemplo numérico



Fonte: O Autor (2021).

Para esse arranjo estrutural, a confiabilidade condicional antes da janela de manutenção é:

$$R_S = R_1(D|A_1^-) * \{1 - [1 - R_2(D|A_2^-)] * [1 - R_3(D|A_3^-)]\} \\ * \{1 - [1 - R_4(D|A_4^-)] * [1 - R_5(D|A_5^-)] * [1 - R_6(D|A_6^-)]\}$$

Assume-se que o sistema seja novo e deva operar uma sequência de $M = 50$ missões antes de ser renovado. Essas missões têm duração fixa de $D = 80$ unidades de tempo e são intercaladas por janelas de manutenção com duração limitada $U = 12$ unidades de tempo. Após operar a primeira missão sem que algum componente tenha falhado, o sistema está disponível para manutenção, caso necessário. A Tabela 8 registra essas informações. Destaca-se que essa tabela consiste de informações dinâmicas, atualizadas sempre que acontece um evento de interesse (falha e manutenção dos componentes ou fim do período de operação).

Tabela 8 - Dados dos componentes após o primeiro período de operação

E	1	2	3	4	5	6
Ac_e^-	80	80	80	80	80	80
A_e^-	80	80	80	80	80	80
X_e^-	1	1	1	1	1	1
n_e^-	0	0	0	0	0	0

Fonte: O Autor (2021).

Além dessas informações, são dados de entrada do modelo os parâmetros das distribuições Weibull, que descrevem os comportamentos de falha dos componentes, exibidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de distribuições Weibull para a vida dos componentes do sistema

E	1	2	3	4	5	6
β_e	2.1	2	2	1.8	1.8	1.8
η_e	360	280	280	210	210	210

Fonte: O Autor (2021).

Como se pode observar, utilizam-se componentes idênticos em cada subsistema. Isso diminui o espaço de busca de soluções para o problema de planejamento estratégico da manutenção, reduzindo substancialmente as opções de limiares para o número de intervenções imperfeitas por componente. Com a mesma finalidade, assume-se que fatores técnicos limitem o número de intervenções imperfeitas a três execuções por componente.

O problema de planejamento estratégico da manutenção também engloba a decisão relativa ao requisito de confiabilidade para retomada da operação do sistema. Embora essa métrica seja uma grandeza contínua, optou-se por discretizar o espaço de busca de soluções no vetor [0.65 0.70 0.75 0.80 0.85]. Dessa forma, busca-se sugerir qual desses valores deva ser adotado como requisito de confiabilidade para retomada de cada operação do sistema. Essa abordagem, além de reduzir o esforço computacional, é mais cognoscível para o tomador de decisões. Ademais, as informações relacionadas ao custo e duração de cada nível de manutenção são exibidas na Tabela 10. Adicionalmente, adota-se um custo de falha do sistema $c_f = 80$ unidades monetárias.

Tabela 10 - Parâmetros das ações de manutenção que podem ser planejadas para o sistema

E	S_e^0	Intervenção Imperfeita		Substituição Preventiva		Substituição Corretiva	
		$c_e(1)$	$t_e(1)$	$c_e(2)$	$t_e(2)$	$c_e(3)$	$t_e(3)$
1	2.5		2.5	14	4	16.8	4.8
2	1.8		1.25	10	3.25	12	3.9
3	1.8		1.25	10	3.25	12	3.9
4	1.5		1	8	3	9.6	3.6
5	1.5		1	8	3	9.6	3.6
6	1.5		1	8	3	9.6	3.6

Fonte: O Autor (2021).

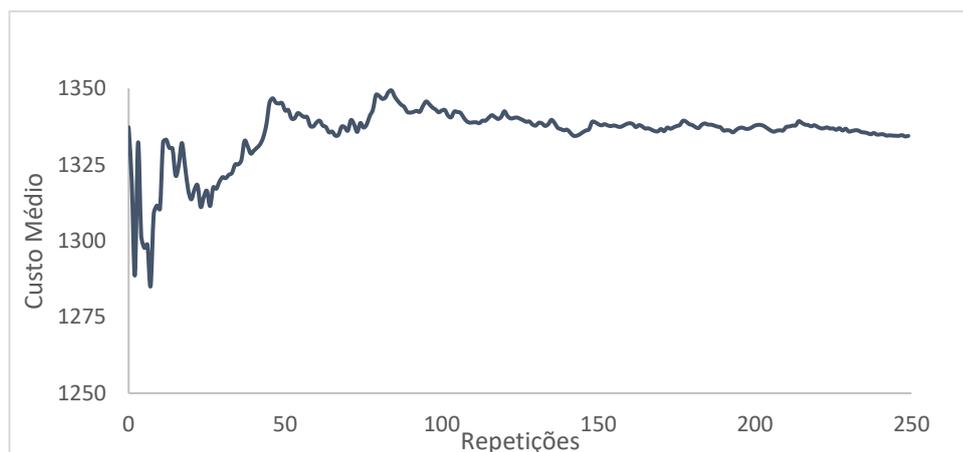
Esclarece-se que a ação preventiva imperfeita é interpretada nesta seção como a remanufatura do componente. Nesse sentido, assume-se que essa intervenção diminua a idade virtual do componente em 50%. A parcela fixa de custo resultante dessa ação pode ser obtida da Equação 18. Para isso, adotam-se os valores $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.25$, $\gamma = 0.05$, $\delta = 3.5$ e $\lambda = 1$ para os parâmetros do modelo para a qualidade das ações imperfeitas (Equação 18).

Adicionalmente, assume-se que a manutenção conjunta de um grupo de componentes resulta no custo de *setup* igual ao maior custo nominal de preparação dentre os componentes do grupo, ou seja, $S_e(G) = \max S_e^0, e \in G$, e que haja uma economia de tempo na ordem de 10% em relação à agregação dos tempos específicos para execução das ações do plano operacional de manutenção, $\Delta T_G = 0,1 * \sum_{e \in G} t_e(l_e)$.

No que concerne aos parâmetros utilizados pelo Algoritmo Genético, a quantidade de indivíduos na população é fixada em 9 indivíduos a cada geração; a probabilidade de cruzamento é de 80%; a probabilidade de mutação é de 10%; as condições de parada do algoritmo são 8 gerações ou o indivíduo com melhor desempenho na população permanecer nesse posto por 4 gerações consecutivas.

Além da característica evolutiva, o algoritmo simula a operação e manutenção do sistema ao longo do horizonte de planejamento. Enfatiza-se a necessidade de se dedicar grande atenção a esse procedimento, dado o interesse de que a simulação reproduza a dinâmica de operação do sistema. Espera-se, também, variações em consequência da dinâmica do sistema. Para reduzir esse efeito, é necessário repetir o procedimento de simulação até que haja uma convergência do custo médio esperado de longo prazo. Nesse sentido, a Figura 12, que registra a variação da média do custo esperado com o aumento do número de repetições, auxilia na identificação de um número adequado de repetições.

Figura 12 – Média do Custo Esperado de Manutenção em função do Número de Repetições



Fonte: O Autor (2021).

Observa-se grande variação no custo médio esperado no longo prazo na porção inicial do gráfico, ao passo que há uma estabilização por volta de 100 repetições; valor que é adotado neste estudo. É necessário enfatizar, entretanto, que essa quantidade de repetições é adequada

para o conjunto de parâmetros utilizado nesse exemplo numérico - uma nova análise precisa ser realizada para outros casos em estudo. Os resultados, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Decisões estratégicas e operacionais de manutenção obtidas através do algoritmo

r_R	n_e	Plano de Manutenção para o curto prazo	Custo Esperado de Manutenção para o longo prazo
0.85	[1 2 2 2 2 2]	[1 1 0 1 0 0]	1482.51
0.80	[1 2 2 2 2 2]	[1 0 1 0 0 0]	1464.63
0.75	[2 3 3 3 3 3]	[0 0 0 0 0 0]	1390.30
0.70	[2 3 3 2 2 2]	[0 0 0 0 0 0]	1405.82
0.65	[3 3 3 2 2 2]	[0 0 0 0 0 0]	1437.97

Fonte: O Autor (2021).

Observa-se que a adoção de um alvo de confiabilidade para a retomada da operação do sistema de 0.75 resulta no menor custo esperado de manutenção. Recomenda-se que a decisão a respeito de que nível de confiabilidade adotar se baseie em uma análise de *trade-off* entre custo e confiabilidade. Nesse sentido, pode-se aumentar a confiabilidade em 10 pontos percentuais ao custo de 7% do custo de referência.

No que diz respeito aos limiares para o número de intervenções imperfeitas por componente, observa-se que, em alguns casos, os fatores econômicos se sobrepõem aos fatores técnicos; isto é, o limiar sugerido ficou abaixo da recomendação técnica para o número de ações imperfeitas consecutivas por componente.

No que concerne ao planejamento operacional da manutenção, não é necessário executar nenhuma ação na primeira janela de manutenção, caso se adote a expectativa de confiabilidade de 0.75 dos três níveis inferiores de confiabilidade, dado que a confiabilidade do sistema após o primeiro período de operação é $R_S = 0.79$. Para os dois níveis acima, recomenda-se a execução da ação imperfeita em mais de um subsistema, o que implica em economia de tempo e capital em virtude da dependência econômica positiva entre os componentes do grupo.

Para fins de comparação, os resultados do exemplo numérico obtidos por enumeração exaustiva recomendam o patamar de confiabilidade de 0.75 e o vetor de limiares [1 3 3 3 3 3], o que implica na expectativa de custo de 1378.9 unidades monetárias. Esses resultados atestam a eficiência do algoritmo desenvolvido neste capítulo.

Esse método também mostrou que, à medida que o requisito de confiabilidade para retomada da missão aumenta, as soluções candidatas que recomendam valores mais altos para os limiares do número de intervenções imperfeitas por componente tornam-se inviáveis.

4.5 CONCLUSÕES

Um bom planejamento da manutenção dos sistemas produtivos é fundamental para que eles operem de maneira satisfatória. Para isso, é necessário que, de tempos em tempos, o sistema seja disponibilizado para a concretização desse planejamento. No entanto, a janela de tempo dedicada para esse fim costuma ser menor que a necessária. Além disso, limitações nos recursos de manutenção restringem ainda mais as opções de planejamento.

Alguns modelos matemáticos se propõem a tratar tais dificuldades e prover planos efetivos para a manutenção dos sistemas. Nesse contexto, o uso de níveis imperfeitos de manutenção se mostra uma estratégia interessante, dado que promove redução dos custos e uso eficiente do tempo. Contudo, tem-se recorrido a essas ações de maneira indiscriminada – não se considera, por exemplo, que existe um limite para o número de intervenções imperfeitas. Assim, este capítulo, propôs-se a considerar isso no planejamento da manutenção. Também foi recomendado um modelo para qualidade das ações imperfeitas. Ambas as propostas apresentam maior aderência à realidade que as abordagens correntes na literatura.

Além disso, os indicadores utilizados para mensurar o desempenho dos sistemas produtivos utilizados nos modelos de manutenção seletiva são eficientes quando se considera alguns períodos de planejamento, contudo, se provam inadequados para horizontes maiores. Neste capítulo, foi proposto um indicador sustentável para o planejamento da manutenção, que relaciona o custo das ações de manutenção ao benefício (confiabilidade) resultante. Em consequência, alcança-se maior efetividade no planejamento de manutenção.

5 CONCLUSÕES

Uma política adequada de manutenção não só provê condições de operação para os sistemas produtivos, mas também figura como um diferencial estratégico para as organizações. Nesse sentido, é cada vez mais necessária a coordenação entre o planejamento de operações e da manutenção em prol dos objetivos organizacionais. Isso exige modelos matemáticos mais elaborados e procedimentos de solução mais sofisticados, fato motivador desta pesquisa. Neste trabalho, empregou-se esforços para relacionar as decisões referentes à manutenção dos sistemas produtivos à outras decisões inerentes às organizações.

Em um primeiro momento, relacionou-se o planejamento da manutenção do sistema orientado a sucessivas operações intercaladas por janelas finitas de manutenção - o que configura um problema de manutenção seletiva - ao planejamento da disponibilização do orçamento de manutenção. Nesse contexto, analisou-se os efeitos da disponibilização integral desse orçamento no início do horizonte de planejamento e da disponibilização em parcelas iguais ao longo desse horizonte. Embora a disponibilização integral forneça um maior poder de decisão, a disponibilização parcelada é mandatória para organizações de pequeno porte e vantajosa para organizações maiores. Sugere-se que estudos futuros investiguem outras estratégias orçamentárias e considerem opções de investimento. Ademais, pode-se considerar os casos em que há um bônus financeiro em decorrência de se reestabelecer a operação do sistema antes que se esgote a janela de manutenção.

Em um momento posterior, relacionou-se os planejamentos estratégico e operacional de manutenção. O planejamento operacional explorado configura-se como um problema de manutenção seletiva. Nesse sentido, propôs-se uma métrica de desempenho distinta daquelas corriqueiramente adotadas na literatura. A justificativa para isso é que os indicadores tradicionalmente utilizados prejudicam o desempenho do sistema a longo prazo. Isso, entretanto, pode ser investigado com maior profundidade (em uma análise de sensibilidade de um estudo futuro).

O planejamento estratégico da manutenção, por sua vez, auxilia o tomador de decisão quanto às aspirações de confiabilidade para retomada de operação do sistema e em decisões relacionadas aos limiares dos números de intervenções preventivas imperfeitas para os componentes do sistema.

Essa categoria de ações de manutenção foi objeto de interesse nas duas etapas desta pesquisa. Em ambos os momentos, essas ações foram consideradas como alternativas para o

consumo eficiente de recursos da organização, além de promover sustentabilidade ambiental. Também, houve preocupação quanto à modelagem da qualidade dessas intervenções, sendo que o primeiro modelo desenvolvido considera os efeitos do erro humano na execução da ação. O segundo modelo expressa a qualidade das ações imperfeitas em função de três variáveis explicativas. Acredita-se que esse modelo pode ser aprimorado através da inserção de aleatoriedade; contudo, prejudica-se a intuitividade do modelo.

Outra questão em comum entre os dois momentos foi o desenvolvimento de um procedimento de resolução dos problemas. Em ambos os casos, optou-se pelo uso de Algoritmos Genéticos. Essa escolha se deu pela adaptabilidade dessa categoria de algoritmo. No primeiro momento, agregou-se as operações de clonagem e recrutamento às tradicionais operações genéticas. No momento posterior, integrou-se o Algoritmo Genético à Simulação de Eventos Discretos. Destaca-se a criticidade da Simulação nesse contexto, tanto no que diz respeito à quantidade das informações providas, quanto ao consumo de tempo computacional para executar um número adequado de repetições. Isso pode ser investigado em trabalhos futuros.

A despeito das interseções entre os dois produtos deste trabalho, considerou-se, nos primeiros modelos, diferentes graus de severidade de operação do sistema produtivo. Isso se relaciona às diferenças entre as condições experimentadas de operação do sistema e aquelas projetadas pelo fabricante. Sugere-se que operações mais heterogêneas sejam consideradas em estudos futuros, bem como que seja investigado o efeito de diferentes coeficientes de severidade nos diferentes subsistemas. Nos modelos posteriores, considerou-se dependência econômica entre os componentes do sistema, que contribuíram para o consumo eficiente dos recursos. Em novos trabalhos, outras categorias de dependência podem ser investigadas.

Para além das contribuições à literatura, espera-se que as ideias desenvolvidas neste trabalho possam ter relevância para o ambiente industrial. Uma das preocupações recorrentes quando do desenvolvimento dos modelos foi torná-los intuitivos; cabe aos profissionais da produção aplicá-los. Por fim, destaca-se a significância desta tese na vida do autor, foram várias as falhas e os momentos de aflição durante sua construção, mas aprendeu-se a ter bom ânimo e a falhar melhor.

REFERÊNCIAS

- ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimization for maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering*, 82: 167-182, 2015.
- ALSYOUF, I. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, 105(1):70–78, 2007.
- ANDERS, G.J.; SUGIER, J. Risk assessment tool for maintenance selection. In: **DEPENDABILITY OF COMPUTER SYSTEMS INTERNATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS**, Szklarska Poreba, 2006, p.306–313.
- ANITYASARI, M.; KASEBERNICK, H.; KARA, S. The role of warranty in the reuse strategy. In: **CIRP CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING PROCEEDINGS**, 14., 2007, p.335–340.
- ARUNRAJ, N.S.; MAITI, J. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. *Safety Science* 48(2):238–247, 2010.
- AZEVEDO, R.; MOURA, M. D. C.; LINS, I. D.; DROGUETT, E. L. A multi-objective approach for solving a replacement policy problem for equipment subject to imperfect repairs. *Applied Mathematical Modelling*, 86: 1-19, 2020.
- AZEVEDO, R.; MOURA, M. D. C.; LINS, I. D.; DROGUETT, E. L. A Decision on Replacement Policy of Systems Subjected to Imperfect Repairs Using Multi-Objective Genetic Algorithms and Discrete Event Simulation. In: **ANNALS OF THE ESREL**, 2015.
- BLICKLE, T.; THIELE, L.A. *A comparison of selection schemes used in genetic algorithms. Computer Engineering and communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1995.*
- BORGONOVO, E.; MARSEGUERA, M.; ZIO, E. A Monte Carlo methodological approach to plant availability modelling with maintenance, aging and obsolescence. *Reliability Engineering & System Safety*, 67(1):61–73, 2000.
- CAO, W.; JIA, X.; HU, Q.; ZHAO, J.; WU, Y. A literature review on selective maintenance for multi-unit systems. *Quality and Reliability Engineering*, 2018, p.1-22.
- CASSADY, C.; POHL, A.; MURDOCK, W. Selective maintenance modeling for industrial systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(02):104–117, 2001.a.
- CASSADY, C.; POHL, A.; MURDOCK, W. Selective maintenance for support equipment involving multiple maintenance actions. *European Journal of Operational Research*, 129(02):252-258, 2001.b.
- CASTRO, R.E. Otimização de Estruturas Multi-objetivos Via Algoritmos Genéticos de Pareto. Rio de Janeiro, Brasil, 2001. (Doutorado – Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharias de Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ).

CHEN, C.; MENG, M.; ZUO, M. Selective Maintenance Optimization for Multi-state Systems. *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 9-12, 1999.

CHEN, C.; LIU, Y.; HUANG, H.-Z. Optimal Load Distribution for Multi-State Systems Under Selective Maintenance Strategy. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUALITY, RELIABILITY, RISK, MAINTENANCE, AND SAFETY ENGINEERING, Chengdu, 2012, p.436–442.

CHUNG, S.; LAU, H.; HO, G.; IP, W. Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach. *Expert Systems with Applications*, 36(6):10188–10196, 2009.

DE ALMEIDA, A.T.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALNCAR, M.H.; FERREIRA, R.J.P.; ALMEIDA-FILHO, A.T., GARCEZ, T.V. Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis. S.L. 2015, 417p.

DAO, C.; ZUO, M.; PANDEY, M. Selective maintenance for multi-state series–parallel systems under economic dependence. *Reliability Engineering & System Safety*, 121:240-249, 2014.

DAO, C.; ZUO, M. Selective maintenance for multi-state systems in variable load conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 166:171-180, 2017.

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

DO, P.; BERENQUER, C. Condition-based maintenance with imperfect preventive repair for a deteriorating production system. *Reliability and Quality Engineering International* 28, 9, 2012, p.624-633.

DO, P.; VOISIN, A.; LEVRAT, E.; IUNG, B. Remaining useful life based maintenance decision making for deteriorating systems with both perfect and imperfect maintenance actions. In: *IEEE CONFERENCE ON PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT (PHM)*, 2013, pp. 1-9.

DUAN, C.; DENG, C.; GHARAEI, A.; WU, J.; WANG, B. Selective maintenance scheduling under stochastic maintenance quality with multiple maintenance actions. *International Journal of Production Research*, 56:23, 7160-7178, 2018.

EMAMI-MEHRGANI, B.; NEUMANN, WP.; NADEAU, S.; BAZRAFSHAN, M. Considering human error in optimizing production and corrective and preventive maintenance policies for manufacturing systems. *Applied Mathematical Modelling*, 40: 2056-2074, 2016.

FERREIRA, R. J.; FIRMINO, P. R. A.; CRISTINO, C. T. A Mixed Kijima Model Using the Weibull-Based Generalized Renewal Processes. *PLoS ONE* 10(7).

GHOSH, D.; ROY, S. Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4):403-407, 2009.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, 2003, 570 p.

GOLDBERG, D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, 1989.

GRIGORIEV A.; KLUNDERT, J.; SPIEKSMAN, F. Modeling and solving the periodic maintenance problem. *European Journal of Operational Research* 172:783–797, 2006.

HICKS, C. A Genetic Algorithm tool for optimizing cellular or functional layouts in the capital goods industry. *International Journal of Production Economics*, 104:598 – 614, 2006.

KALLEN, M. J. Modelling imperfect maintenance and the reliability of complex systems using superposed renewal processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6): 636–641, 2011.

KANCEV, D.; GJORGIEV, B.; CEPIN, M. Optimization of test interval for ageing equipment: A multi-objective genetic algorithm approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24: 397-404, 2011.

KHATAB, A.; DAHANE, M.; AIT-KADI, D. Genetic algorithm for selective maintenance optimization of multi-mission oriented systems. IN: 22nd EUROPEAN SAFETY AND REABILITY ANNUAL CONFERENCE PROCEEDINGS, Amsterdam, 2014 p. 859 -865.

KHATAB A.; AGHEZZAF E.-H. Selective maintenance optimization when quality of imperfect maintenance actions are stochastic. *Reliability Engineering and System Safety*, 150: 182-189, 2016.

KHATAB A.; AGHEZZAF E.-H. DIALLO, C.; DJELLOUL, I. Selective maintenance optimization for series-parallel systems alternating missions and scheduled breaks with stochastic durations. *International Journal of Production Research* 55(10): 3008-3024, 2017.

KHATAB A.; DIALLO, C.; VENKATADRI, U.; LIU, Z.; AGHEZZAF E.-H. Optimization of the joint selective maintenance and repairperson assignment problem under imperfect maintenance. *Computers & Industrial Engineering* 125 (2018): 413-422.

KIJIMA, M.; MORIMURA, H.; SUZUKI, Y. Periodical replacement problem without assuming minimal repair. *European Journal of Operational Research*, 37(2): 194–203, 1998.

KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(09):992-1007, 2006.

LABIB, A.W. World-class maintenance using a computerized maintenance management system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 4 (1):66–75, 1998.

LIE, C.; CHUN, Y. An algorithm for preventive maintenance policy. *IEEE Transaction on Reliability* 35, 1 (1986), 71-75.

LIN, D.; ZUO, M.; YAM, M. General sequential imperfect preventive maintenance models. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 07(03): 253-266, 2000.

- LIU, Y.; HUANG, H. Z. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 59(02): 356–367, 2010.
- LO, H.; YU, R. A study of quality management strategy for reused products. *Reliability Engineering and System Safety* 119, p. 172-177, 2013.
- MAAROUFI, G.; CHELBI, A.; REZG, N. A selective maintenance policy for multi-component systems involving replacement and imperfect preventive maintenance actions. In: 5TH IESM CONFERENCE, 2013. Proceedings. Rabat, 2013. p. 1-8.
- MAILLART, L. M.; CASSADY, C. R.; RAINWATER, C.; SCHNEIDER, K. Selective Maintenance Decision-Making Over Extended Planning Horizons. *IEEE Transactions on Reliability*, 58(03): 462 – 469, 2009.
- METTAS, A. Reliability allocation and optimization for complex systems. IN: IEEE PROCEEDINGS OF THE ANNUAL RELIABILITY AND MAINTENABILITY SYMPOSIUM (2000), pp. 216 – 221.
- NAKAGAWA, T. Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability* 37(3) 295-308, 1998.
- NICOLAI, R. P.; DEKKER, R. Optimal maintenance of multi-component systems: a review. In: *Complex system maintenance handbook*. London: Springer; p. 263–86, 2008.
- PANDEY, M.; ZUO, M. J.; MOGHADDASS, R.; TIWARI, M. K. Selective maintenance for binary systems under imperfect repair. *Reliability Engineering and System Safety*, 113:42 – 51, 2013.
- PENG, Y.; DONG, M.; ZUO, M.J. Current status of machine prognostics in condition- based maintenance - a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34:1181–1193, 2010.
- PHAM, H.; WANG, H. Imperfect Maintenance. *European Journal of Operation Research*, 425- 438, 1996.
- RAZALI, N. M.; GERAGHTY, J. Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP. In: PROCEEDINGS OF THE WORLD CONGRESS ON ENGINEERING, 1134-1139, 2011.
- RIBEIRO, L.F.A; CAVALCANTE, C. A. V. ; RODRIGUEZ, T. F. O. . Selective maintenance for multi mission oriented systems. In: RISK, RELIABILITY AND SAFETY, 1179 – 1184, 2017.
- RIBEIRO, L. F. A.; CAVALCANTE, C. A. V. Selective maintenance model for mission-oriented systems considering heterogeneous missions and budget constraints. In: PROCEEDINGS OF THE 10TH IMA INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELLING IN INDUSTRIAL MAINTENANCE AND RELIABILITY, 131-134, 2018.
- RIBEIRO, L. F. A.; DANTAS, P. P. L.; CAVALCANTE, C. A. V. A selective maintenance model based on FITradeoff method. In: PROCEEDINGS OF THE 10TH IMA INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELLING IN INDUSTRIAL MAINTENANCE AND RELIABILITY, 125-130, 2018.

- RICE, W. F.; CASSADY, C. R.; NACHLAS, J. A. Optimal maintenance plans under limited maintenance time. *Proceedings of the Seventh Industrial Engineering Research Conference*, 1998.
- SAMROUT, M.; CHATELET, E.; KOUTA, R.; CHEBBO, N. Optimization of maintenance policy using the proportional hazard model. *Reliability Engineering & System Safety* 94(1):44–52, 2009.
- SANDVE, K.; AVEN, T. Cost optimal replacement of monotone, repairable systems. *European Journal of Operational Research*, 116(2):235–248, 1999.
- SANTOS, A.; CAVALCANTE, C.; RIBEIRO, L. The use of second-hand items based on delay time modelling. *Process Safety and Environmental Protection* 146 (4) 2021
- SCHNEIDER, K.; CASSADY, C.R. Fleet performance under selective maintenance. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, p. 571-576, 2004.
- SIBIDE, I.; KHATAB, A.; DIALLO, C.; KASSAMBARA, A. Preventive maintenance optimization for a stochastically degrading system with a random initial age. *Reliability Engineering & System Safety*. 159, 255–263, 2017.
- SIVANANDAM, S.N.; DEEPA, S.N. *Introduction to Genetic Algorithms*. Berlin, Springer, 2008, 453 p.
- SWANSON, L. Linking maintenance strategies to performance. *International Journal of Production Economics*, 709(3):237–244, 2001.
- TERSINE, R.J. *Production/operations management: concepts, structure, and analysis*. Elsevier Science Publisher, New York, 1995.
- TOLEDO, M. L. G.; FREITAS, M. A.; COLOSIMO, E. A.; GILARDONI, G. L. ARA and ARI imperfect repair models: Estimation, goodness-of-fit and reliability prediction. *Reliability Engineering & System Safety*, 140:107-115, 2015.
- TSAI, Y.; WANG, K.; TENG, H. Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms. *Reliability Engineering and System Safety*, 74(01): 89-97, 2001.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. *Metodologia da pesquisa em Engenharia de Produção*. Minas Gerais: UNIFEI, 2012.
- VAN HORENBEEK A.; PINTELON, L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety* 120:39–50, 2013.
- VASILI, V.; HONG, T.S.; ISMAIL, N.; VASILI, M. Maintenance optimization models: a review and analysis. IN: PROCEEDINGS OF THE 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011 p.1131-1138.

VINODH, S.; VARADHARAJAN, A.R. Application of fuzzy VIKOR for concept selection in agile environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 42:1025–1033, 2012.

XU, Q.-Z.; GUO, L.-M.; SHI, H.-P.; WANG, N. Selective maintenance problem for series-parallel system under economic dependence. *Defense Technology* 12: 388 – 400, 2016.

YEH, H.; LO, H.; YU, R. A study of maintenance policies for second-hand products. *Computers & Industrial Engineering* 60, 438–444, 2011.

**APÊNDICE A – ESTRATÉGIA PARA SOLUÇÃO DE MODELOS DE
MANUTENÇÃO INTEGRADOS A DECISÕES ORÇAMENTÁRIAS**

Início

Carregar parâmetros do Algoritmo Genético

Enquanto população estiver incompleta:

 Criar indivíduo (matriz)

 Avaliar viabilidade do indivíduo

Se indivíduo é viável, **então**:

 Inserir indivíduo na população

Enquanto critério de parada do algoritmo não for satisfeito:

 Registrar indivíduos na matriz 'Pais'

 Agrupar os indivíduos de 'Pais' em pares

Enquanto existirem pares que não cruzaram:

 Sortear posições de corte

 Fazer o intercâmbio das informações dos pais

 Registrar o resultado do cruzamento na matriz 'Filhos'

Enquanto existir indivíduo em 'Filhos' não mutado:

 Selecionar gene e valor a ser atualizado

 Inserir indivíduo na matriz 'Mutados'

 Avaliar fitness dos indivíduos 'Pais', 'Filhos' e 'Mutados'

 Inserir o melhor indivíduo de 'Pais' na nova população

 Excluir indivíduos inviáveis de 'Filhos' e 'Mutados'

 Ordenar 'Filhos' e 'Mutados' com base no fitness

 Inserir $\%C_p$ de indivíduos 'Filhos' na nova população

 Inserir $\%M_p$ de indivíduos 'Mutados' na nova população

Enquanto nova população estiver incompleta:

 Criar indivíduo (matriz)

 Avaliar viabilidade do indivíduo

Se indivíduo é viável, **então**:

 Inserir indivíduo na população

Retornar o melhor indivíduo

Fim

**APÊNDICE B – ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO PARA OS MODELOS DE MANUTENÇÃO
INTEGRADOS - DECISÕES DE CURTO E LONGO PRAZOS**

Início

Carregar os níveis de aspiração de confiabilidade

Enquanto faltar algum desses níveis ser avaliado:

Selecionar nível de confiabilidade não avaliado

Carregar parâmetros do Algoritmo Genético (AG)

Enquanto critério de parada não satisfeito:

Se não é a primeira geração do AG, **então**:

Selecionar indivíduos (estratégia da roleta)

Cruzar indivíduos (estratégia de um ponto de corte)

Mutar os indivíduos

Enquanto houverem indivíduos faltando na população:

Atribuir valores ao vetor de limiares

Inserir indivíduo (vetor) na população

Enquanto faltar avaliar indivíduo da população:

Selecionar indivíduo não avaliado

Assumir que indivíduo é viável

Enquanto indivíduo viável, **faça**:

Carregar parâmetros da Simulação

Enquanto o número de replicações for insuficiente:

Se indivíduo for inviável, **então**:

Atribuir avaliação negativa ao indivíduo

Break

Senão:

Enquanto horizonte ainda não simulado:

Carregar informações da operação corrente

Carregar parâmetros da Enumeração Exaustiva

Gerar, exaustivamente, os planos de manutenção

Filtrar os planos de manutenção inviáveis

Se restarem planos viáveis, **então**:

Selecionar plano com melhor custo-benefício

Simular os efeitos da manutenção do sistema

Simular os efeitos da operação do sistema

Senão:

Atualizar inf. viabilidade do indivíduo

Break

Calcular custo acumulado

Calcular custo médio esperado para o indivíduo

Break

Recomendar nível de aspiração com menor custo médio esperado

Recomendar o vetor de limiares associado a esse nível

Recomendar as ações para a janela de manutenção corrente

Fim