



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOYCE DANIELLE DE ARAÚJO

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICA DE REPARO IMPERFEITO BAYESIANO  
CONSIDERANDO ALARP**

Caruaru

2021

JOYCE DANIELLE DE ARAÚJO

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICA DE REPARO IMPERFEITO BAYESIANO  
CONSIDERANDO ALARP**

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

**Orientador:** Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes

Caruaru

2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário – Raul César de Melo - CRB/4 - 1735

A663p Araújo, Joyce Danielle de.  
Proposição de política de reparo imperfeito bayesiano considerado considerando  
ALARP / Rodrigo Sampaio Lopes. – 2021.  
100 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Rodrigo Sampaio Lopes.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2021.  
Inclui Referências.

1. Sistemas de segurança. 2. Administração de risco. 3. Manutenção. I. Lopes,  
Rodrigo Sampaio (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2021-223)

JOYCE DANIELLE DE ARAÚJO

**PROPOSIÇÃO DE POLÍTICA DE REPARO IMPERFEITO BAYESIANO  
CONSIDERANDO ALARP**

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

Aprovada em: 25/08/2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Marcele Elisa Fontana (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Maico Roris Severino (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Goiás

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço e louvo a Deus por tudo que É e por tudo que tem feito, principalmente por estar comigo em todos os momentos. A Ele seja toda glória.

Aos meus pais, Jorge Daniel e Maria Lindinalva, por todo amor, esforço e apoio.

Às minhas irmãs, Jéssica Dayane e Geysel Mariana, pelo companheirismo.

Aos tutores, orientadores e colegas que me acompanharam durante a graduação, em especial aos membros do PET – AÇÕES das Engenharias, bem como dos projetos de pesquisa e extensão que participei.

A todos os amigos, tanto os antigos quanto os conquistados em Pernambuco, pelo incentivo e suporte.

Ao PPGEP – CAA pela oportunidade de pesquisa, pelo ambiente fértil de conhecimento e pelas pessoas que me permitiu conhecer.

Ao meu orientador, Rodrigo Sampaio, por ser um mentor dedicado e paciente, pelos conselhos, pelos incentivos e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos membros da banca examinadora, Rodrigo Sampaio, Marcele Fontana e Maico Severino, pelo empenho em analisar este trabalho e pelas valiosas sugestões de melhoria.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal e Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o mestrado.

Em suma, sou grata a Deus e a todos que Ele usou para me ajudar a chegar até aqui.

## RESUMO

A gestão da manutenção possui função estratégica nas organizações por colaborar para o bom desempenho operacional, a redução dos custos e o aumento da segurança. Devido a estreita relação entre otimização da manutenção e risco, a literatura tem apresentado políticas de reparo perfeito baseadas em restrições de segurança e critérios de aceitação do princípio *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP). Todavia, as atividades de manutenção nem sempre restauram os equipamentos a um estado tão bom quanto novo, manutenções imperfeitas podem ocorrer por diversos fatores de ordem tecnológica, metodológica ou humana. Assim, este trabalho propõe uma política de substituição por idade baseado em reparo imperfeito bayesiano com implementação do princípio (ALARP), em combinação com critérios de aceitação de risco. A política incorpora o caso em que a falha pode ser minimamente ou perfeitamente reparada com probabilidades aleatórias, devido às diferentes habilidades dos integrantes das equipes de manutenção. Para tanto, houve a realização de revisão da literatura sobre ALARP e gestão da manutenção, modelagem analítica, aplicações numéricas e análise do impacto da qualidade da ação de manutenção no ALARP. O modelo proposto engloba a otimização de manutenção e o gerenciamento de risco, uma vez que a finalidade é determinar a idade de substituição que minimiza o custo esperado por unidade de tempo, de forma que o índice de risco atenda aos critérios de aceitação de risco do ALARP. Houve a implementação do modelo com e sem o uso do fator de desproporção no ALARP, tanto para o caso do horizonte infinito e quanto para o caso de um ciclo de substituição. Os resultados das aplicações numéricas mostram que a consideração do reparo imperfeito acarreta o aumento dos custos de substituição e diminuição da idade ótima de substituição quando comparado ao reparo perfeito. De maneira similar, o aumento do fator de desproporção aumenta os custos de manutenção do sistema, o que ocasiona a necessidade de diminuir a idade ótima de substituição dos equipamentos para conservar a segurança e confiabilidade do sistema. Percebeu-se que o parâmetro de forma e a qualidade do reparo influenciaram mais na idade ótima de substituição do que os valores das distribuições *a priori*. Por meio dos resultados das análises de sensibilidade, entende-se que o presente modelo é aplicável em situações reais onde há conflitos de interesse entre gestão da manutenção e risco.

**Palavras-chave:** *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP); Critérios de Aceitação de Risco; Reparo Imperfeito Bayesiano; Política de Substituição por Idade; Conhecimento *a priori*.

## ABSTRACT

Maintenance management has a strategic role in organizations as it contributes to good operational performance, cost reduction and increased safety. Due to the close relationship between maintenance optimization and risk, the literature has presented perfect repair policies based on security constraints and acceptance criteria of the As Low As Reasonably Practicable (ALARP) principle. However, maintenance activities do not always restore the equipment to a state as good as new, imperfect maintenance can occur due to several technological, methodological or human factors. Thus, this work proposes an age replacement policy based on Bayesian imperfect repair with the implementation of the principle (ALARP), in combination with risk acceptance criteria. The policy incorporates the case where the failure can be minimally or perfectly fixed with random probabilities, due to the different skills of the members of the maintenance teams. For this, there was a literature review on ALARP and maintenance management, analytical modeling, numerical applications and analysis of the impact of the quality of maintenance action on ALARP. The proposed model encompasses maintenance optimization and risk management since the purpose is to determine the replacement age that minimizes the expected cost per unit of time, so that the risk index meets the risk acceptance criteria of the ALARP. The model was implemented with and without the use of the disproportion factor in ALARP, both for the case of the infinite horizon and for the case of a substitution cycle. The results of numerical applications show that considering the imperfect repair leads to an increase in replacement costs and a decrease in the optimal replacement age when compared to the perfect repair. Similarly, the increase in the disproportion factor increases the system's maintenance costs, which makes it necessary to reduce the optimal replacement age of equipment to preserve the system's safety and reliability. It was noticed that the shape parameter and the repair quality influenced more on the optimal replacement age than the values of the prior distributions. Through the results of the sensitivity analyses, it is understood that this model is applicable in real situations where there are conflicts of interest between maintenance and risk management.

**Keywords:** As Low As Reasonably Practicable (ALARP); Risk Acceptance Criteria; Bayesian Imperfect Repair; Age Replacement Policy; Prior Knowledge.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fluxograma 1 –	Etapas metodológicas da pesquisa.....	19
Quadro 1 –	Categoria das técnicas de análise e avaliação de risco.....	23
Diagrama 1 –	Diagrama gravata-borboleta para a configuração de otimização de manutenção.....	24
Figura 1 –	Regiões de risco e VPF associado.....	25
Quadro 2 –	Critérios para cálculo dos scores.....	29
Gráfico 1 –	Distribuição dos artigos nas fontes de busca.....	30
Quadro 3 –	Critérios de inclusão e exclusão.....	30
Figura 2 –	Quantidade de artigos aprovados em cada etapa da revisão.....	31
Gráfico 2 –	Distribuição dos artigos ao longo dos anos.....	32
Mapa 1 –	Distribuição geográfica dos artigos.....	37
Figura 3 –	Nuvem de palavras.....	37
Figura 4 –	Áreas de aplicação do ALARP.....	39
Quadro 4 –	Quadro 4 – Resumo dos artigos analisados sob a ótica do ALARP e da manutenção.....	41
Quadro 5 –	Resumo dos artigos analisados sob a ótica do risco e da manutenção....	42
Quadro 6 –	Características do modelo proposto.....	44
Fluxograma 2 –	Composição dos custos do modelo.....	47
Figura 5 –	Possíveis falhas em um ciclo e os concernentes custos por unidade de tempo.....	51
Figura 6 –	Custo esperado de longo prazo para $\beta = 2$ .....	54
Figura 7 –	Custo esperado de longo prazo para $\beta = 2.5$ e $\beta = 3$ .....	55
Figura 8 –	Custo esperado de longo prazo com e sem ALARP.....	56
Figura 9 –	Custo ótimo de longo prazo para diferentes valores de $p$ .....	56
Figura 10 –	Erro percentual do custo ótimo (horizonte infinito).....	61
Figura 11 –	PLL assintótico e do limite do PLL para diferentes valores de $p$ .....	62
Figura 12 –	Custo de um ciclo de substituição para $\beta = 2$ .....	65
Figura 13 –	Custo de um ciclo de substituição para $\beta = 2.5$ e $\beta = 3$ .....	66
Figura 14 –	Custo de um ciclo de substituição com e sem ALARP.....	66
Figura 15 –	Custo ótimo de um ciclo de substituição para diferentes valores de $p$ ...	67
Figura 16 –	Erro percentual do custo ótimo (um ciclo de substituição).....	67

Figura 17 –	Custo esperado de longo prazo para dois pontos a priori para $\beta = 2$ .....	74
Figura 18 –	Custo esperado de longo prazo para dois pontos a priori e diferentes valores de $p_2$ e $\beta$ .....	75
Figura 19 –	PLL superior para dois pontos a priori variando $\beta$ e $\pi$ .....	82
Figura 20 –	Custo de um ciclo de substituição para dois pontos a priori para $\beta = 2$ .....	83
Figura 21 –	Síntese do desempenho da idade ótima e do custo ótimo.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição dos artigos de acordo com o <i>journal</i> de publicação.....	33
Tabela 2 – Resultados para um ponto a <i>priori</i> .....	58
Tabela 3 – Análise de sensibilidade para um ponto a <i>priori</i> (horizonte infinito).....	64
Tabela 4 – Custo de um ciclo de substituição para um ponto a <i>priori</i> .....	69
Tabela 5 – Análise de sensibilidade para um ponto a <i>priori</i> (um ciclo de substituição).....	71
Tabela 6 – Síntese dos resultados para um ponto a <i>priori</i> .....	72
Tabela 7 – Resultados para dois pontos a <i>priori</i> quando $p_1 = 0.8$ , $\pi_1 = 0.5$ e $\pi_2 = 0.5$ .....	76
Tabela 8 – Resultados para dois pontos a <i>priori</i> quando $p_1 = 0.8$ , $\pi_1 = 0.4$ e $\pi_2 = 0.6$ .....	79
Tabela 9 – Síntese dos resultados para 2 pontos a <i>priori</i> (horizonte infinito).....	84

## LISTA DE SIGLAS

ABAO	<i>As Bad As Old</i>
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
AGAN	<i>As Good As New</i>
ALARP	<i>As Low as Reasonable Possible</i>
CAFe	Comunidade Acadêmica Federada
ETA	<i>Evente Tree Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
GEM	<i>Gas Export Manifold</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i>
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
ICAF	<i>Implied Cost of Averting a Fatality</i>
MAUT	<i>Multiple Attribute Utility Theory</i>
NHPP	<i>Non-Homogeneous Poisson Process</i>
PLL	<i>Potential Loss of Life</i>
QADS	<i>Quantitative Assessment of Domino Scenarios</i>
QRA	<i>Quantitative Risk Assessment</i>
RBIM	<i>Risk-Based Integrity Modeling</i>
RBM	<i>Risk Based Maintenance</i>
SASS	<i>Situation Awareness Support System</i>
SRA	<i>Society for Risk Analysis</i>
VPF	<i>Value of a Prevented Fatality</i>
VSL	<i>Value of a Statistical Life</i>
WRA	<i>Weighted Risk Analysis</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>BASE CONCEITUAL.....</b>	<b>20</b>
5.1	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO IMPERFEITA.....	20
5.2	RISCO E AÇÕES DE MANUTENÇÃO.....	22
5.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	27
<b>6</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>28</b>
6.1	ETAPAS PARA ELABORAÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA.....	28
<b>6.1.1</b>	<b>Planejamento – Identificação de bases de dados e definição das <i>Keywords</i>...</b>	<b>28</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Execução – Seleção de artigos.....</b>	<b>29</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Resultados – Extração e análise das informações.....</b>	<b>31</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Questão 1.....</b>	<b>38</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Questão 2.....</b>	<b>40</b>
6.2	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	43
<b>7</b>	<b>MODELO PROPOSTO.....</b>	<b>44</b>
7.1	NOTAÇÃO.....	45
7.2	PRESSUPOSTOS DO MODELO.....	46
7.3	POLÍTICA DE SUBSTITUIÇÃO POR IDADE.....	46
<b>7.3.1</b>	<b>Custo esperado por unidade de tempo.....</b>	<b>49</b>
7.3.1.1	Caso do horizonte infinito.....	49
7.3.1.2	Caso de um ciclo de substituição.....	51
7.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	52
<b>8</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
8.1	UM PONTO A <i>PRIORI</i> .....	53
<b>8.1.1</b>	<b>Caso do horizonte infinito.....</b>	<b>54</b>
<b>8.1.2</b>	<b>Caso do ciclo de substituição.....</b>	<b>65</b>
<b>8.1.3</b>	<b>Síntese dos resultados para um ponto a <i>priori</i>.....</b>	<b>71</b>

8.2	DOIS PONTOS A <i>PRIORI</i> .....	73
8.2.1	<b>Caso do horizonte infinito</b> .....	<b>74</b>
8.2.2	<b>Caso do ciclo de substituição</b> .....	<b>83</b>
8.2.3	<b>Síntese dos resultados para dois pontos a <i>priori</i></b> .....	<b>83</b>
8.3	QUATRO PONTOS A <i>PRIORI</i> .....	85
8.4	IMPLICAÇÕES GERENCIAIS.....	86
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>88</b>
9.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	88
9.2	LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	89
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As falhas em sistemas produtivos podem impactar negativamente o custo e a disponibilidade dos sistemas, bem como causar perdas relacionadas à segurança e meio ambiente (ABBAS; SHAFIEE, 2020). Por isso, faz-se necessário o desenvolvimento e a aplicação de técnicas que aperfeiçoem a função de manutenção a níveis competitivos e cuja abordagem se estenda além da análise custo-benefício.

As atividades de manutenção objetivam aumentar a confiabilidade dos sistemas, e, conseqüentemente, o seu nível de segurança (VATN; AVEN, 2010). Dentre várias técnicas e metodologias que buscam o aumento da confiabilidade e disponibilidade dos sistemas, como também a redução dos custos, encontra-se a otimização das políticas de manutenção. A depender da conjuntura, as políticas de substituição por idade com reparo perfeito ainda se apresentam como alternativas econômicas e efetivas.

Todavia, nem todos os reparos ocorrem como planejados, o que torna importante a consideração das incertezas quanto a qualidade das ações de manutenção (TOLEDO *et al.*, 2015). De forma que, o reparo imperfeito se aproxima mais da realidade, pois permite supor que a qualidade da ação de manutenção pode ser afetada por diversos fatores, tais como qualificação e habilidades do pessoal de manutenção, além dos métodos e ferramentas utilizados (KHATAB; AGHEZZAF, 2016; SHEU *et al.*, 2019).

No contexto da manutenção imperfeita, o reparo imperfeito bayesiano permite considerar que a qualidade da ação de manutenção é uma variável aleatória governada por uma distribuição de probabilidade apropriada, onde as probabilidades de reparar o sistema perfeitamente são diferentes para cada colaborador, visto que estes possuem habilidades de reparo diferentes (LIM; QU; ZUO, 2016). Além disso, possibilita a inserção do conhecimento de especialistas, bem como a obtenção de resultados confiáveis, ainda que poucos dados sejam disponibilizados (TUAN; YANN; MITRA, 2015).

Tendo em vista a complexidade dos sistemas produtivos, as incertezas relacionadas a qualidade da ação de manutenção, ao tempo em que os equipamentos irão falhar e as conseqüências das falhas, os gestores de manutenção enfrentam o desafio de definir estratégias de manutenção que considerem juntamente os custos e os riscos envolvidos nas decisões.

Nas situações que envolvem o risco, o princípio *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP) pode ser utilizado para limitar o risco de acordo com a regulamentação imposta e as práticas de segurança almejadas, considerando os custos (JONES-LEE; AVEN, 2011). O princípio declara que os riscos devem ser reduzidos, exceto quando houver uma desproporção

grosseira entre os recursos necessários e os benefícios das medidas de segurança (AVEN; ABRAHAMSEN, 2007).

Desta forma, as atividades de manutenção contribuem para a mitigação das falhas e o controle dos riscos de acidentes, os quais podem ser priorizados e tratados com o auxílio do princípio ALARP. Por outro lado, erros podem ocorrer durante as ações de manutenção. Neste sentido, o presente trabalho possui o seguinte problema de pesquisa: Como a incerteza da qualidade da ação de manutenção tem impacto nos princípios de risco considerando o ALARP?

O trabalho está dividido conforme descrito a seguir. O Capítulo 1 trata da definição e contextualização do tema. O Capítulo 2 é composto pelos objetivos da pesquisa. A justificativa e a metodologia do trabalho são expostas nos Capítulos 3 e 4, respectivamente.

No Capítulo 5 apresenta-se a base conceitual com definições e conceitos preliminares utilizados para a elaboração deste trabalho, abordando a manutenção imperfeita e o ALARP.

O Capítulo 6 refere-se aos principais resultados da revisão da literatura, apontando as principais áreas de aplicação do ALARP e sua utilização no âmbito da manutenção de equipamentos.

O Capítulo 7 descreve o modelo proposto para o caso do horizonte infinito e de um ciclo de substituição.

No Capítulo 8 são apresentados os resultados e discussões do modelo com ênfase na aplicação numérica e nas implicações gerenciais.

Por fim, o Capítulo 9 verifica o atendimento aos objetivos, expõe as contribuições da pesquisa, indica as limitações e apresenta as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 OBJETIVOS

Este capítulo apresenta os objetivos geral e específicos.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa propor uma política de substituição por idade com reparo imperfeito bayesiano que considere o risco e analisar como a incerteza da qualidade da ação de manutenção tem impacto no ALARP.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, tem-se:

- Compreender como o princípio ALARP é abordado no contexto da gestão da manutenção;
- Propor uma política de substituição por idade baseada em reparo imperfeito bayesiano com implementação do princípio ALARP, em combinação com critérios de aceitação de risco;
- Analisar como a incerteza da qualidade da ação de manutenção tem impacto no ALARP.

### 3 JUSTIFICATIVA

Os desafios dos gestores de manutenção abrangem a elaboração de estratégias que colaborem para minimização dos custos e preservação da função dos equipamentos, como também da segurança das pessoas e do meio ambiente. Por isso, o planejamento de manutenção precisa estar associado com outras funções estratégicas das organizações, tais como controle de qualidade, planejamento da produção e gerenciamento de risco.

As ações de manutenção podem aumentar a confiabilidade dos sistemas e impactar positivamente na segurança, de tal modo que contribui para a minimização do risco de acidentes. Por outro lado, existe a possibilidade de introdução de falhas e ocorrência de acidentes durante a manutenção dos equipamentos, tais como explosões, incêndios e liberações tóxicas (VATN; AVEN, 2010). Desta maneira, faz-se necessário que a gestão da manutenção e o gerenciamento do risco estejam articulados.

Na busca desta integração, alguns trabalhos tem introduzido restrições de segurança à otimização de manutenção e argumentam sobre a necessidade de averiguar além da análise custo-benefício (AVEN; CASTRO, 2008, 2009; FLAGE *et al.*, 2012). Outras pesquisas implementaram os critérios de aceitação do princípio ALARP na otimização de manutenção, de forma que o custo ótimo de substituição compreendeu a minimização dos custos de manutenção e a redução dos riscos de acidentes (FLAGE, 2013, 2018).

Nos trabalhos mencionados acima existe a suposição de que a manutenção ocorre sem erros e os itens são perfeitamente restaurados. Entretanto, as atividades de manutenção nem sempre restauram os equipamentos a um estado tão bom quanto novo, ocasionando manutenções imperfeitas, danos e quebra de equipamentos que podem impactar negativamente em diversos elementos, por exemplo, qualidade dos produtos, custos, tempo de produção, disponibilidade, confiabilidade e segurança (PHAM; WANG, 1996; RIVERA-GÓMEZ *et al.*, 2021).

Além disso, a falta de conhecimento, a presença de informações incompletas e a compreensão errônea das informações podem ser reais em problemas de manutenção e exigem atenção adequada. Nestes contextos, o uso de probabilidades bayesianas se torna oportuno por permitir a consideração de conhecimentos obtidos antes da ocorrência dos eventos e a atualização desses conhecimentos ao longo do tempo.

Tendo em vista que reparos imperfeitos podem acontecer e que a manutenção dos equipamentos está integrada a gestão de risco, torna-se necessário a estruturação de uma política de manutenção que abranja o reparo imperfeito bayesiano e os critérios de aceitação de risco

do ALARP para a investigação de como a qualidade da ação de manutenção impacta no risco e como este afeta os custos esperado por unidade de tempo.

#### 4 METODOLOGIA

Em relação à abordagem, esta pesquisa é caracterizada como qualiquantitativa. Quantitativa no que tange a representatividade numérica de dados e qualitativa no que concerne a necessidade de interpretação dos dados obtidos para melhor compreensão da estruturação e aplicação da política de manutenção proposta (GIL, 2010).

Quanto à natureza, é uma pesquisa aplicada, visto que se resume a um contexto específico, ou seja, visa gerar conhecimento para a aplicação prática e a solução de problemas específicos (PROVDANOV; FREITAS, 2013).

Quanto aos objetivos, a pesquisa possui elementos exploratórios, descritivos e explicativos. Os elementos exploratórios estão presentes na concessão de mais informações relacionadas a manutenção imperfeita e ALARP por meio da revisão da literatura. Além disso, o modelo proposto apresenta um novo enfoque para a obtenção do custo ótimo de substituição, uma vez que se concentra tanto na minimização do custo de substituição por idade quanto no atendimento dos critérios de aceitação de risco.

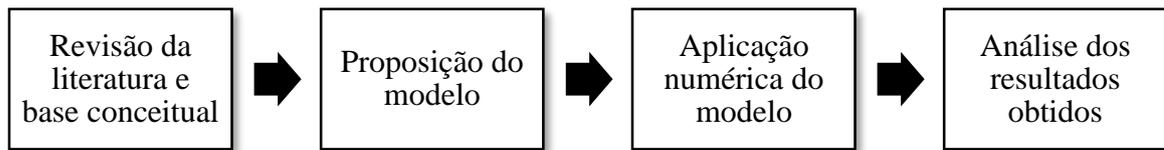
Por retratar o passo a passo utilizado para a proposição de um modelo, a pesquisa também é descritiva. O caráter explicativo do trabalho está relacionado à identificação dos fatores que contribuem para que determinados fenômenos aconteçam, aprofundando o conhecimento da realidade (GIL, 2010).

Conforme ilustrado no Fluxograma 1, a estruturação metodológica da pesquisa consistiu em quatro etapas. Inicialmente realizou-se uma fundamentação teórica para obtenção do embasamento metodológico e teórico da política proposta. Nesta etapa foram elaboradas a base conceitual, como também, a revisão da literatura sobre ALARP e gestão da manutenção.

A elaboração da base conceitual possibilitou a compreensão do problema e forneceu suporte para a proposição do modelo por meio do conhecimento obtido sobre conceitos, modelos e metodologias relacionados à manutenção industrial e à gestão de risco.

A revisão da literatura sobre ALARP e gestão da manutenção foi realizada de acordo com as etapas propostas por Hernandez *et al.* (2012) e possibilitou a identificação das principais áreas de aplicação do ALARP, ao passo que contribuiu para a compreensão de como este princípio é empregado na gestão da manutenção. Desta maneira, constatou-se a necessidade de pesquisas que investigassem o impacto da incerteza da qualidade da ação de manutenção nos princípios de risco considerando o ALARP.

Fluxograma 1 – Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: A Autora (2021)

Na sequência, foi proposta uma política de substituição por idade baseada em reparo imperfeito bayesiano com implementação do princípio ALARP em combinação com critérios de aceitação de risco. A formulação do modelo matemático englobou o caso do horizonte de planejamento infinito e de um ciclo de substituição com a finalidade de obter o menor custo esperado por unidade de tempo que esteja em conformidade com os critérios de aceitação de risco. Assim, o critério de otimalidade foi analítico e ponto ótimo foi obtido por meio de um processo de busca exaustiva de ponto ótimo (enumeração).

Nessa etapa foram definidos os parâmetros considerados no modelo e seus respectivos valores iniciais, de forma que representassem a realidade de um sistema produtivo com possibilidade de acidentes devido a falhas. A modelagem e os cálculos foram executados com a utilização da linguagem de programação Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2020).

Ademais, efetuou-se aplicações numéricas do modelo e análises de sensibilidade para demonstrar a aplicabilidade da política proposta, verificar se o modelo se comporta da maneira esperada e eliminar possíveis erros de lógica ou de programação. Para tanto, considerou-se que a taxa de falha do sistema pode ser formulada de acordo com uma distribuição *Weibull*. Após a análise dos resultados, com o intuito de averiguar como a qualidade da ação de manutenção impacta nos critérios de aceitação de risco do ALARP, foram realizadas as considerações sobre o modelo proposto para apresentação de suas contribuições, suas limitações e as sugestões para trabalhos futuros.

## 5 BASE CONCEITUAL

Neste capítulo serão abordados os conceitos essenciais para a construção do modelo e entendimento dos próximos capítulos.

Serão tratadas algumas definições relacionadas a manutenção, as classificações das políticas de manutenção baseadas no tempo, classificação das ações de manutenção quanto ao grau de restauração do sistema e as políticas de manutenção por idade que foram levadas em consideração para a elaboração do modelo proposto.

Além disso, serão apresentados alguns conceitos e ferramentas referentes à gestão de risco e como a análise de risco tem sido incorporada em alguns trabalhos que tratam da otimização de manutenção.

### 5.1 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO IMPERFEITA

A manutenção dos sistemas pode se dar de maneira corretiva ou preventiva. No primeiro caso, a manutenção é realizada após o sistema falhar, e no segundo caso, são realizadas atividades que evitem degradação e falhas inesperadas no sistema (ZHOU *et al.*, 2020).

No que concerne as políticas de substituição preventiva, estas podem ser baseadas no tempo ou na condição do equipamento. As políticas de substituição baseadas no tempo, são classificadas em: (i) *substituição por idade* – na qual o item é substituído em uma determinada idade ou quando o item falhar, o que ocorrer primeiro; (ii) *substituição por intervalos (ou blocos)* – nesse caso, o item é substituído em intervalos fixos ou quando ocorrer a falha (BARLOW; PROSCHAN, 1965; BARLOW; HUNTER, 1960).

Quanto ao grau de restauração das condições operacionais do item após a manutenção, Pham e Wang (1996) classificam a manutenção da seguinte forma:

- Manutenção Perfeita ou Reparo Perfeito – Recupera a função do sistema para um estado tão bom quanto novo (*As Good As New – AGAN*);
- Manutenção Mínima ou Reparo Mínimo – Restaura a função do sistema para o período anterior à falha, apresentando-se da mesma forma de antes, ou seja, condição tão ruim quanto velho (*As Bad As Old – ABAO*);
- Manutenção Imperfeita ou Reparo Imperfeito – Restaura o funcionamento do sistema para um estado entre tão bom quanto novo e tão ruim quanto velho;
- *Worse maintenance* ou *worse repair* – Torna a condição do sistema pior do que antes da falha, a ação de manutenção aumenta a taxa de falha ou idade do sistema, no entanto, não ocorre quebra;

- *Worst maintenance* ou *worst repair* – Ocasiona falha ou quebra do sistema.

Os autores afirmam ainda que o grau de restauração é influenciado pelo tipo do sistema, os custos envolvidos, a confiabilidade requerida, como também a habilidade do pessoal de manutenção.

Os erros nas ações de manutenção podem estar relacionados com diversos fatores, tais como (BROWN; PROSCHAN, 1982; NAKAGAWA; YASUI, 1987; RUIZ-HERNÁNDEZ; PINAR-PÉREZ; DELGADO-GÓMEZ, 2020):

- Reparar a peça errada;
- Reparar parcialmente a peça defeituosa;
- Reparar, parcial ou totalmente, a peça defeituosa, mas danificar peças adjacentes;
- Avaliar incorretamente a condição da unidade inspecionada;
- Executar ações de manutenção em períodos inadequados;
- Não detectar falhas ocultas e defeitos durante a manutenção;
- Utilizar ferramentas e componentes que não possuem boa qualidade;
- Presença de erros humanos, como ajustes errados e introdução de mais danos durante a manutenção;
- Ambiente e limitações tecnológicas.

Desta forma, nota-se que os erros de manutenção podem ser causados por fatores de caráter tecnológico, metodológico ou humano. Para minimizar as falhas e preservar o desempenho do sistema, de acordo com suas limitações, são necessários planos de manutenção que indiquem o momento de reparo do item e o grau de manutenção almejado. Tais planos são conhecidos como políticas de manutenção (HAGHIGHI; CASTANIER; MISAI, 2021).

Reparar um item após a sua falha resulta em perdas, sejam elas operacionais, ambientais ou de segurança. Por outro lado, a substituição precoce do item pode ocasionar em um elevado custo para as organizações. Desta forma, são desenvolvidos estudos que buscam apresentar políticas de manutenção ideais para determinados contextos.

No que diz respeito às políticas de substituição por idade baseadas em reparo imperfeito, Brown e Proschan (1983) sugerem um modelo de reparo imperfeito em que o item é perfeitamente reparado com probabilidade  $p$  ou minimamente reparado com probabilidade  $q = 1 - p$ . No modelo de Fontenot e Proschan (1984), o item é perfeitamente reparado (substituído) na idade  $T$ , sendo que, em falhas intermitentes (manutenção corretiva) é levada em consideração a manutenção imperfeita.

O modelo apresentado por Lim, Lu e Park (1998) trata a probabilidade de o item ser reparado perfeitamente como uma variável aleatória (reparo imperfeito bayesiano). Lim, Qu e Zuo (2016) consideram o reparo imperfeito bayesiano e supõem que o item é substituído por um novo na idade  $T$  e pode ser perfeitamente ou minimamente reparado nas falhas intermitentes, tais autores formulam o custo esperado por unidade de tempo para os casos de horizonte infinito e um ciclo de substituição.

No modelo de Lim, Qu e Zuo (2016) a probabilidade de reparo perfeito é uma probabilidade bayesiana caracterizada por distribuições a *priori*. O uso de tais distribuições permite que as incertezas sobre quantidades desconhecidas sejam expressas, pois englobam conhecimento baseado em dados, informações, testes, argumentação ou suposições de especialistas (AVEN, 2020). Por isso, em circunstâncias que a confiabilidade do sistema é alta, torna-se atrativo o uso da probabilidade bayesiana, tendo em vista que a coleta de dados sobre os tempos de falha é difícil, ocasionando em desconhecimento parcial ou total dos parâmetros do modelo (GUAN; TANG; XU, 2019).

De acordo com Aven (2020) probabilidades bayesianas são probabilidades subjetivas que podem ou não conter a equação de Bayes em sua composição. Ao se trabalhar com probabilidades bayesianas, as informações podem ser modeladas de acordo com distribuições a *priori* ou a *posteriori*. A distribuição a *priori*, engloba informações obtidas antes do acontecimento do evento, por exemplo, dados ou conhecimento de especialistas. Após a ocorrência do evento, com base nos resultados apresentados e na distribuição a *priori*, pode ser desenvolvida a distribuição a *posteriori*. Assim, o uso da probabilidade bayesiana permite que os modelos sejam atualizados ao longo do tempo com a chegada de novas informações e atualização da distribuição a *priori*.

## 5.2 RISCO E AÇÕES DE MANUTENÇÃO

Aven (2010) afirma que apesar de haver várias definições de risco na literatura, a maioria delas convergem no que diz respeito ao risco envolver eventos, consequências e probabilidades.

Dentre as definições apresentadas no glossário da *Society for Risk Analysis* (SRA, 2018, p. 4), tem-se que o “risco é as consequências de uma atividade e as incertezas associadas”. Nesta definição as consequências são vistas como os efeitos da atividade, considerando todos os estados, eventos, barreiras e resultados. Além disso, o termo incerteza busca incorporar a informação inexistente, incompleta ou imperfeita.

Em muitas situações a incerteza é refletida no risco por meio de probabilidades frequentistas ou probabilidades subjetivas. As primeiras expressam a frequência relativa de determinado evento dada uma população infinita de situações analisadas, enquanto as probabilidades subjetivas permitem a consideração da incerteza (grau de crença) do avaliador em relação a ocorrência dos eventos (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

Todavia, alguns trabalhos discutem a necessidade de enxergar além dos valores esperados e buscar alternativas que complementem as análises (AVEN, 2013b; TALEB, 2010; VATN; AVEN, 2010), pois o uso dos valores esperados pode não diagnosticar corretamente os eventos raros e extremos. Por exemplo, o caso de eventos com baixa probabilidade e graves consequências e eventos com baixa consequência e alta probabilidade.

Ademais, o processo de análise de risco pode envolver várias imprecisões, tais como: falta de compreensão sobre os fenômenos, previsões ruins, suposições com grandes simplificações, ausência de dados, ausência de confiança nos dados obtidos e falta de concordância entre os especialistas (FLAGE; AVEN, 2009). Desta forma, alguns trabalhos enfatizam a necessidade de revisão e julgamento gerencial para que os resultados numéricos obtidos sejam discutidos sistematicamente, de maneira que as incertezas e outras preocupações que não foram capturadas anteriormente sejam englobadas (AVEN, 2013a).

Uma vez identificados os riscos, as técnicas de análise e avaliação de risco podem ser classificadas em três categorias, expostas no Quadro 1:

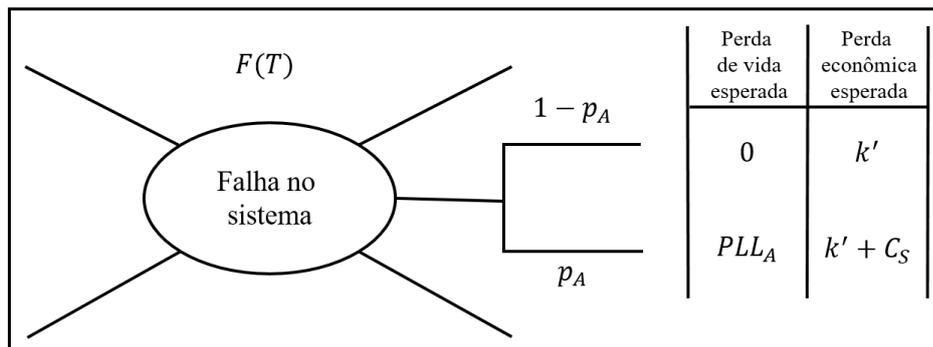
Quadro 1 – Categoria das técnicas de análise e avaliação de risco

<b>Categoria</b>	<b>Técnicas</b>
<b>Qualitativas</b>	Lista de verificação; <i>Estudo de Perigos e Operabilidade (Hazard and Operability Study – HAZOP);</i> <i>Análise What-if.</i>
<b>Quantitativas</b>	Avaliação Quantitativa de Risco ( <i>Quantitative Risk Assessment – QRA</i> ); Avaliação Quantitativa de Cenários ( <i>Quantitative Assessment of Domino Scenarios – QADS</i> ); Análise de risco ponderado ( <i>Weighted Risk Analysis – WRA</i> ).
<b>Híbridas</b>	Análise de Árvore de Falhas ( <i>Fault Tree Analysis – FTA</i> ); Análise de Árvore de Eventos ( <i>Event Tree Analysis – ETA</i> ); Manutenção Baseada no Risco ( <i>Risk Based Maintenance – RBM</i> ).

Fonte: Adaptado de Mohammadfam e Zarei (2015)

Um outro método utilizado para análise de risco é *Bow-Tie* (Gravata-Borboleta) que combina a análise de árvore de falhas e a análise de árvore de eventos. No Diagrama 1 é ilustrado um diagrama *Bow-Tie* adaptado para a configuração de falha no sistema.

Diagrama 1 – Diagrama gravata-borboleta para a configuração de otimização de manutenção



Fonte: FLAGE (2013)

No meio do diagrama está o evento inicial (falha do sistema), no lado esquerdo devem ser apontadas as causas potenciais do evento inicial e no lado direito as consequências potenciais do evento inicial com suas respectivas probabilidades. As consequências foram divididas entre perdas econômicas e de vida.

Caso não ocorra o acidente  $A$  devido a falha (com probabilidade  $1 - p_A$ ), haverá apenas perdas financeiras, ou seja, o usual custo da falha ( $k'$ ). Se, ocorrer um acidente  $A$  devido a falha (com probabilidade  $p_A$ ), haverá perda de vida potencial devido ao acidente  $A$  (*Potential Loss of Life* –  $PLL_A$ ), ou seja, número esperado de mortes. Além disso, será acrescentado nas perdas financeiras o custo de segurança ( $C_s$ ), conforme a Equação (2.1) (VATN; AVEN, 2010).

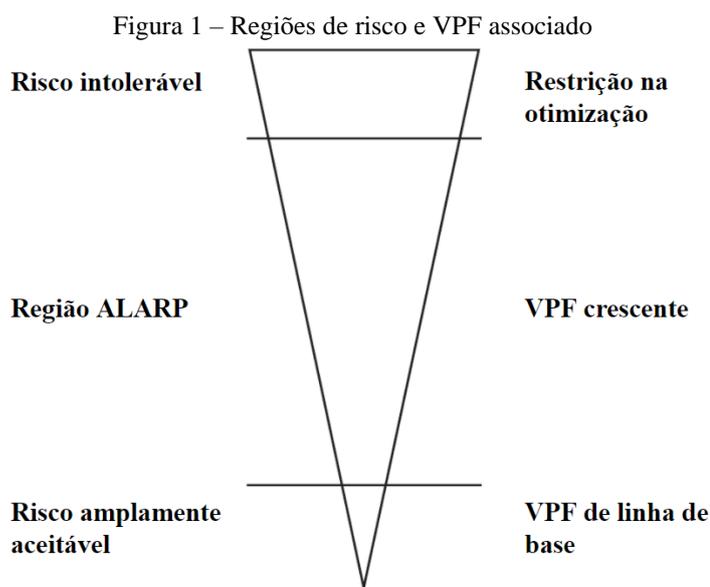
$$C_s = p_A PLL_A v \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1),  $v$  representa o Valor de Prevenir uma Fatalidade (*Value of a Prevented Fatality* – VPF), também conhecido como Valor Estatístico de uma Vida (*Value of a Statistical Life* – VSL) ou Custo Implícito de Evitar uma Fatalidade (*Implied Cost of Averting a Fatality* – ICAF). Os valores de  $v$  e  $PLL_A$  são obtidos por meio da avaliação quantitativa do risco. O VPF não deve ser entendido como o custo de uma vida, mas o quanto se está disposto a pagar para uma redução média do risco, é comum que este valor esteja entre 1 a 10 milhões de dólares (VATN; AVEN, 2010).

Para definir a priorização e a forma de tratamento dos riscos, estes precisam ser comparados com critérios pré-determinados de tolerabilidade de risco. Dentre os princípios adotados para esta avaliação e tratamento encontra-se o *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP), em conjunto com os critérios de aceitação de risco.

Como apresentado na Figura 1, o princípio ALARP classifica os riscos em três regiões (BAYBUTT, 2013):

- Risco inaceitável: Risco alto. Não é justificável aceitar esse nível de risco, exceto em situações extraordinárias.
- Risco tolerável ou região ALARP: Risco aceitável se sua mitigação for impraticável, ou seja, o esforço para reduzi-lo é grosseiramente desproporcional aos impactos da redução incremental. O esforço pode ser em termos de custo, tempo ou consumo de outro recurso.
- Risco aceitável: Risco baixo. Não apresenta muita preocupação.



Fonte: FLAGE (2018)

Com o uso do princípio ALARP, busca-se reduzir o risco para o nível tão baixo quanto razoavelmente possível. De tal maneira que, abaixo desse nível o risco pode ser reduzido, mas o custo da redução adicional excede grosseiramente os benefícios (JONES-LEE; AVEN, 2011).

A *Health and Safety Executive* (2001) defende que um risco individual de morte menor que  $10^{-6}$  por ano pode ser tido como aceitável, tanto para trabalhadores quanto para o público. Ao passo que, quando o risco individual ultrapassa o valor de  $10^{-3}$  por ano para trabalhadores e  $10^{-4}$  por ano para o público, torna-se inaceitável. De forma que, os riscos que se encontram entre a região aceitável e inaceitável são alocados na região ALARP.

Quando existe um risco de múltiplas fatalidades em um único evento, a *Health and Safety Executive* (HSE) sugere o uso da Curva F-N que também classifica o risco em inaceitável, tolerável e aceitável. A curva é obtida ao plotar a frequência na qual cada evento pode causar a morte de  $N$  ou mais pessoas *versus*  $N$  vítimas (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 2001).

No contexto da otimização de manutenção, Flage (2013) propõe que o índice de risco seja expresso em função do parâmetro  $T$  associando evento (falha do sistema), consequência ( $PLL_A$ )

e probabilidade de ocorrer o acidente ( $p_A$ ), de acordo com a Equação (2.2). Para ser aceitável, o nível de risco  $R(T)$  deve estar compreendido entre os critérios de aceitação  $r_0$  e  $r_1$ .

$$R(T) = \left[ F(T) \left( 1 + \left\lfloor \frac{u}{T} \right\rfloor \right) - F \left( T - \left( u - \left\lfloor \frac{u}{T} \right\rfloor T \right) \right) \right] p_A PLL_A \quad (2.2)$$

A Equação (2.2) diz respeito ao limite máximo do PLL, este é uma aproximação para o índice de risco em  $u$  (geralmente, um ano) quando o equipamento é substituído na idade  $T$ , assumindo que apenas uma pessoa seja exposta ao risco relacionado à manutenção do sistema em questão.

Além disso, o autor modela o PLL assintótico que representa o valor do PLL quando  $t$  tende ao infinito, conforme a Equação (2.3).

$$u \frac{F(T) p_A PLL_A}{\int_0^T \bar{F}(x) dx} \quad (2.3)$$

Medidas de redução de risco devem ser implementadas, exceto se houver uma desproporção bruta entre os recursos necessários e os benefícios. Com a utilização do fator de desproporção bruta, mesmo que o ônus seja maior que os benefícios, as medidas de redução de risco só serão consideradas não-praticáveis se o ônus exceder grosseiramente os benefícios, desta forma traz-se maior ganho para a segurança.

Segundo Abrahamsen *et al.* (2018), ao se utilizar o princípio ALARP, diferentes contextos de tomada de decisão exigem diferentes interpretações e valores do critério de desproporção grosseira porque devem ser consideradas as particularidades de cada situação (ABRAHAMSEN *et al.*, 2018).

O fator de desproporção bruta ( $d$ ) do princípio ALARP pode ser inserido na modelagem como uma função crescente do nível de risco para ajustar a desproporção existente entre o risco e os custos associados a sua mitigação (FLAGE, 2013), como exposto na Equação (2.4).

$$C_s = p_A PLL_A d(R(T)) v \quad (2.4)$$

Desta forma, quando o nível de risco se encontra na região amplamente aceitável, o VPF de linha de base é equivalente a  $d = 1$ . Quando o nível de risco estiver na região ALARP, ou seja, entre  $r_0$  e  $r_1$ , o VPF será crescente de acordo com a função de  $d(R(T))$ . Índices de risco maiores que  $r_1$  são inaceitáveis.

Diante disso, o custo total da falha será expresso no modelo de otimização de manutenção pela soma do custo fixo devido à falha ( $k'$ ) e o custo esperado em segurança ( $C_s$ ) caso a falha resulte um acidente (VATN; AVEN, 2010).

Por meio de uma revisão de literatura, o próximo capítulo apresenta as áreas em que o princípio ALARP foi utilizado nos últimos anos e expõe como é tratada a conexão entre este princípio e a gestão da manutenção nos trabalhos estudados.

### 5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a base conceitual referente às áreas de estudo desta dissertação. No primeiro momento, foram abordados aspectos relacionados com a manutenção imperfeita, tais como a ocorrência de erros durante as ações de manutenção, graus de reparação do sistema e as políticas de manutenção consideradas para a elaboração do modelo proposto.

Em seguida, introduziu-se questões referentes a gestão de risco e as ações de manutenção, em especial a inserção do princípio ALARP na otimização de manutenção.

## 6 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre ALARP e gestão da manutenção contendo a análise das principais áreas de aplicação do ALARP e a sua introdução no âmbito da gestão de manutenção. Almeja-se observar os estudos atuais e quais são as lacunas, direcionando e aprofundando o estudo sobre o ALARP e políticas de manutenção.

### 6.1 ETAPAS PARA ELABORAÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura teve como objetivo identificar artigos com aplicações do princípio ALARP e averiguar como a gestão da manutenção tem abordado este princípio.

O estudo ocupou-se em responder duas questões de pesquisa:

- (1) Quais são as principais áreas de interesse dos pesquisadores que estudam o ALARP?
- (2) Como o ALARP é integrado na manutenção de equipamentos?

Para realização da revisão tomou-se como referência as etapas propostas por *Hernandes et al.* (2012): planejamento, execução e sumarização dos resultados.

Na etapa de planejamento, elaborou-se o protocolo para síntese das principais informações e procedimentos que conduziram a pesquisa: objetivo, questões da pesquisa, palavras-chave, fontes de busca, *strings* de busca, critérios de inclusão, critérios de exclusão e definição de quais informações seriam extraídas dos artigos.

Durante a execução foram identificados e selecionados os estudos com base nos critérios definidos no protocolo, bem como extraídas as informações. Por fim, a sumarização consistiu-se na análise e síntese dos resultados alcançados.

#### 6.1.1 Planejamento – Identificação de bases de dados e definição das *Keywords*

As fontes de busca utilizadas para a pesquisa dos trabalhos foram *IEEE Xplorer*, *Science Direct*, *Scopus* e *Web of Science*. A escolha dessas fontes de busca deu-se pela relação existente entre o tema pesquisado e o conteúdo indexado. A pesquisa considerou artigos de *journals* com acesso livre ou com possibilidade de acesso por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe) e publicados no idioma inglês. A combinação das *keywords* definidas resultou nas seguintes *strings* de busca:

- “ALARP”
- “ALARP” AND “*risk*”
- “ALARP” AND “*risk management*”
- “ALARP” AND “*risk assessment*”

- “ALARP” AND “*risk analysis*”
- “ALARP” AND “*maintenance*”
- “ALARP” AND “*imperfect maintenance*”
- “ALARP” AND “*maintenance policy*”
- “ALARP” AND “*risk based maintenance*”
- “ALARP” AND “*reliability*”
- “ALARP” AND “*availability*”
- “ALARP” AND “*down time*”

### 6.1.2 Execução – Seleção de artigos

Nesta etapa foram selecionados os artigos que continham as *strings* de busca no título, no resumo ou nas palavras-chave. Os arquivos em formato RIS e BibTeX foram exportados das fontes de busca e importados no *software* StArt (*State of the Art through Systematic Review*) versão 3.0.3 beta (ZAMBONI *et al.*, 2010) para organização e análise. Os trabalhos foram ranqueados com base em um *score* para direcionamento da ordem de leitura. O Quadro 2 mostra os critérios utilizados para cálculo dos *scores*.

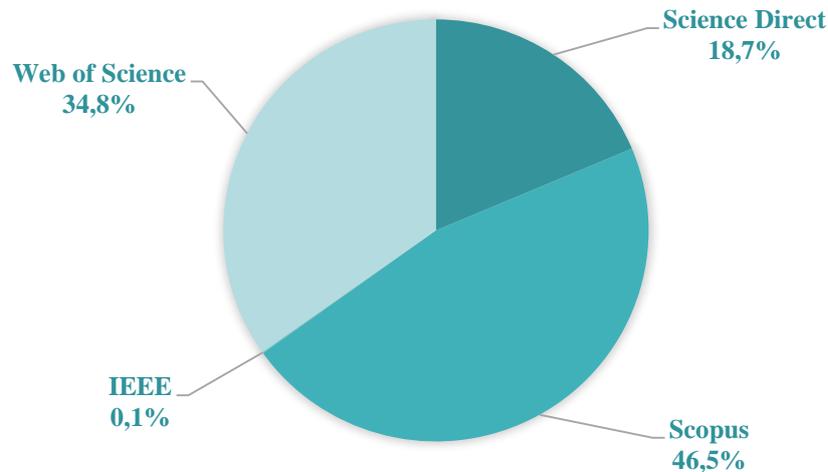
Quadro 2 – Critérios para cálculo dos scores

Critérios	Pontuação por ocorrência
Palavras-chave no título	5
Palavras-chave no resumo	3
Palavras-chave nas palavras-chave do artigo	2

Fonte: A Autora (2021)

Desta forma, foram identificados 1104 artigos distribuídos de acordo com o Gráfico 1. A maior quantidade de artigos foi encontrada na *Scopus* (46,5%) e na *Web of Science* (34,8%).

Gráfico 1 – Distribuição dos artigos nas fontes de busca



Fonte: A Autora (2021)

Uma vez coletados os artigos, houve a leitura dos resumos e a seleção foi filtrada por meio dos critérios de inclusão e exclusão descritos no Quadro 3. Os artigos coletados foram publicados entre 1986 e 2020, todavia, a revisão se restringiu aos trabalhos publicados entre 2000 e 2020.

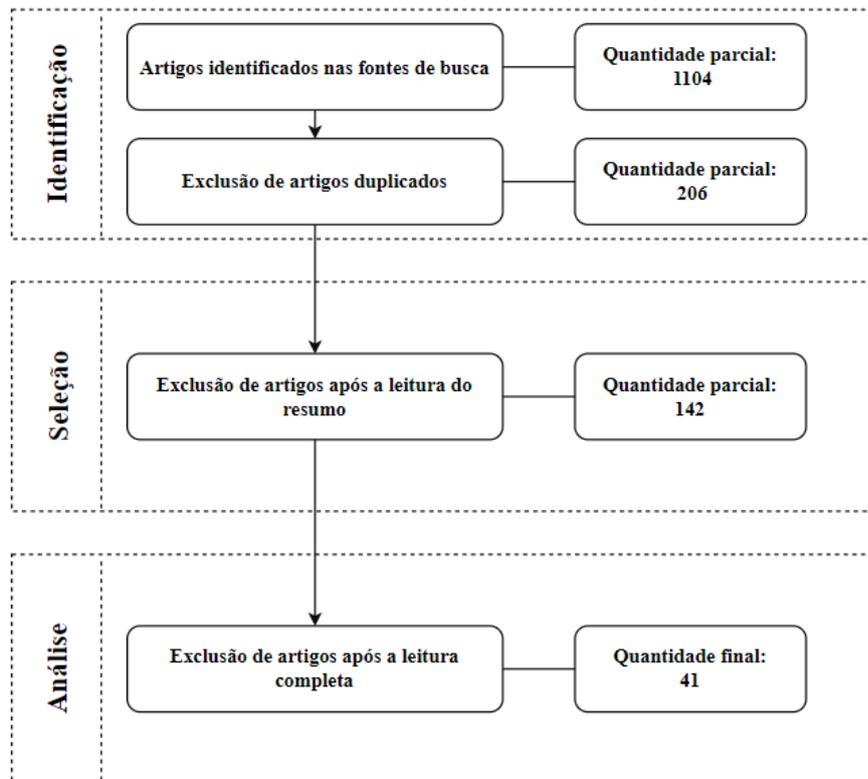
Quadro 3 – Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artigos de pesquisa que apliquem ou debatam a aplicação do ALARP;</li> <li>• Artigos que considerem o ALARP na gestão da manutenção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artigos que não apresentem o texto completo;</li> <li>• Artigos em que o termo ALARP não é utilizado no contexto da gestão de risco;</li> <li>• Artigos que não foram publicados entre 2000 e 2020.</li> </ul>

Fonte: A Autora (2021)

Foram eliminados os estudos que apresentaram pelo menos um dos critérios de exclusão ou eram duplicatas. Assim, após eliminar os 898 artigos duplicados e os 64 artigos que não estavam de acordo com os critérios de inclusão, 142 trabalhos seguiram para a etapa de análise e extração dos dados. Como será apresentado na subseção 3.4, na etapa de análise foram excluídos 102 trabalhos. A Figura 2 resume a quantidade de trabalhos aprovados em cada etapa da revisão.

Figura 2 – Quantidade de artigos aprovados em cada etapa da revisão



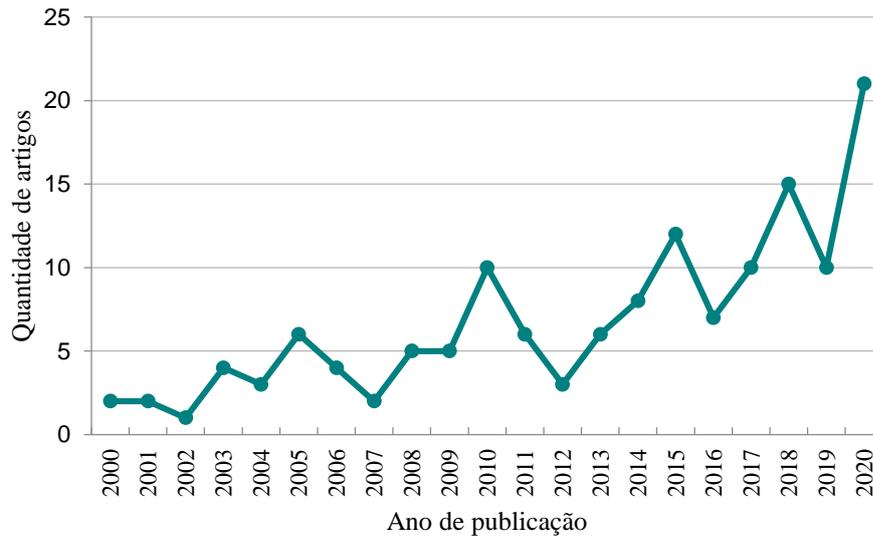
Fonte: A Autora (2021)

### 6.1.3 Resultados – Extração e análise das informações

Todos os trabalhos que se enquadraram nos critérios de seleção foram lidos por completo e avaliados. A etapa de análise e extração de informação considerou inicialmente 142 artigos.

O Gráfico 2 apresenta a distribuição dos trabalhos por ano. Nota-se um comportamento crescente de publicações ao longo dos últimos anos, com destaque para os anos de 2018 e 2020 que contaram com 15 e 21 trabalhos, respectivamente. Tal crescimento pode ser justificado pelo desenvolvimento da aplicação da análise de risco em várias áreas de interesse, devido à tendências como a globalização, a digitalização e o desenvolvimento sustentável (AVEN; FLAGE, 2020).

Gráfico 2 – Distribuição dos artigos ao longo dos anos



Fonte: A Autora (2021)

Na Tabela 1 os trabalhos estão distribuídos conforme o *journal* e o ano de publicação. A revisão manifestou uma diversidade de periódicos em diferentes áreas de interesse, todavia, se destacaram os *journals* com foco na segurança e confiabilidade.

O *Reliability Engineering & System Safety* e o *Journal of Loss Prevention in The Process Industries* obtiveram a maior quantidade de publicações, seguidos do *Process Safety and Environmental Protection* e do *Chemical Engineering Transactions*.

Tabela 1 – Distribuição dos artigos de acordo com o *journal* de publicação (continua)

Journal	Ano																				Total		
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019		2020	
AAP																					1	1	
Applied Radiation and Isotopes																				1			1
Applied Sciences																						1	1
Aquatic Mammals																					1		1
BEE																						1	1
BEGE																						1	1
CET																1	3	1	1	3			9
Dams and Reservoirs															1								1
Decision Support Systems															1								1
Energies																1						1	3
Energy																				1		1	1
Engineering Geology														1								1	2
Environmental Earth Sciences																						1	1
EJOR												1											1
ERCPC									1														1
Fire Safety Journal															1						2	1	4
Fire Technology																					1		1
Fusion Engineering and Design		1		1		1						1								1			5
Geoenvironmental Disasters																						1	1
HERA																1						1	2
IJOEM																				1			1
IJERPH																						1	1
IJES					1																		1
IJHE																1						1	2
IJMNSS																							1
IJRAM																					1		1
IJSSE																				1			1
JATM							1																1
JACMP														1									1
JAMC																						1	1
Journal of Hazardous Materials												1											1
JIEM																1							1
Journal of Konbin									1														1
JLPPI										1	2			1	1		1	1				3	10



Tabela 1 – Distribuição dos artigos de acordo com o *journal* de publicação (conclusão)

Journal	Ano																				Total		
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019		2020	
Structural Safety						1																	1
Sustainability																1			2				3
Underwater Technology																1							1
Water Resources Management																			1				1
WIT: TEE												1											1
Work																			1				1
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>142</b>	

### Siglas

AAP - *Accident Analysis and Prevention*

BEE - *Bulletin of Earthquake Engineering*

BEGE - *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*

CET - *Chemical Engineering Transactions*

EJOR - *European Journal of Operational Research*

ERCP - *Expert Review of Clinical Pharmacology*

HERA - *Human and Ecological Risk Assessment*

IJERPH - *International Journal of Environmental Research and Public Health*

IJES - *International Journal of Environmental Studies*

IJHE - *International Journal of Hydrogen Energy*

IJOEM - *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*

IJRAM - *International Journal of Risk Assessment and Management*

IJSSE - *International Journal of Safety And Security Engineering*

IJMNSS - *International Journal on Marine Navigation And Safety of Seatransportation*

JACMP - *Journal of Applied Clinical Medical Physics*

JAMC - *Journal of Ayub Medical College*

JATM - *Journal of Air Transport Management*

JIEM - *Journal of Industrial Engineering and Management*

JLPPI - *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*

JMST - *Journal of Marine Science and Technology*

JOMAE - *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*

JOPCF - *Journal of Performance of Constructed Facilities*

JQME - *Journal of Quality in Maintenance Engineering*

JRMGE - *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*

JRP - *Journal of Radiological Protection*

JRUES - *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*

NHESS - *Natural Hazards and Earth System Sciences*

OPRD - *Organic Process Research and Development*

PPTE - *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*

PTTRSA - *Philosophical Transactions of The Royal Society A*

PSEP - *Process Safety and Environmental Protection*

QREI - *Quality and Reliability Engineering International*

RESS - *Reliability Engineering & System Safety*

WIT: TEE – *WIT: Transactions on Ecology and The Environment*

Fonte: A Autora (2021)

Ao averiguar o país do autor correspondente dos trabalhos, verificou-se a sua distribuição geográfica e elaborou-se o Mapa 1. O Reino Unido ocupou o primeiro lugar no *ranking* com 34 publicações, o que pode ser justificado pelo fato do ALARP ter sido inicialmente proposto por regulamentos desse território (JONES-LEE; AVEN, 2011) e pela presença de plataformas *offshore* ao longo da sua extensão, ramo que se destaca na Figura 9 como um dos que mais aplicam o ALARP.

A China contou com 22 trabalhos, a maioria deles pertinentes a transporte de gás natural, geomecânica, como também controle e gestão de barragens. A Noruega apresentou 20 artigos geralmente representados por pesquisas sobre plataformas de petróleo e gás. Além disso, a Austrália e os Estados Unidos foram representados com 9 e 8 trabalhos, respectivamente. Os demais países apresentaram 5 ou menos de 5 artigos. Não foram identificadas publicações brasileiras e o único país da América do Sul que contou com publicações foi a Colômbia (1 artigo).

O princípio ALARP é uma ferramenta importante no gerenciamento de risco, por isso, a ausência do Brasil na lista de países que publicam sobre o ALARP pode indicar que as leis ambientais se apresentam inadequadas ou deficientes. De acordo com Mallett *et al.* (2021), ainda não há o devido apoio nas etapas de implementação e fiscalização das leis ambientais brasileiras. Este é um acontecimento que preocupa diversos países, uma vez que as últimas décadas foram marcadas pelo crescimento de leis ambientais em boa parte do mundo, todavia, a implementação dessas leis ainda se apresenta fraca, o que culmina em barreiras para a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável (UN ENVIRONMENT, 2019).



#### 6.1.4 Questão 1

A questão 1 foi “Quais são as principais áreas de interesse dos pesquisadores que estudam o ALARP?”. A Figura 4 contém as principais áreas em que o ALARP foi citado, estudado ou aplicado nas pesquisas averiguadas, seja por meio de exemplos ilustrativos, estudos de caso ou discussões.

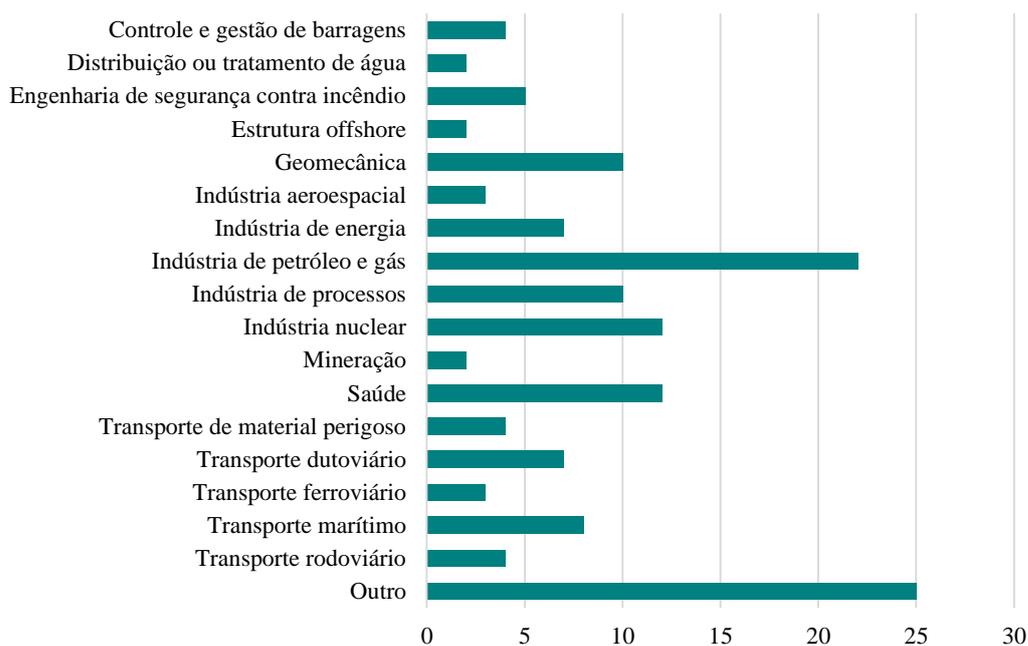
Algumas pesquisas apresentavam discussões sobre o ALARP em mais de uma esfera, porém levou-se em consideração aquela que os autores trataram com maior profundidade ou se destacavam no título e nas palavras-chave. A categoria “Outro” encontrada na Figura 4 corresponde as áreas que foram notadas apenas uma vez ou não foram especificadas nos trabalhos.

A indústria de petróleo e gás exibiu maior número de aplicações (15,49%). A indústria nuclear (8,45%) e a indústria de processos (7,04%) também apresentaram uma quantidade considerável de trabalhos. Tal resultado pode explicado pelo fato desses setores exporem seus colaboradores e a sociedade a altos níveis de risco, por isso necessitam monitorar e controlar os riscos com maior cautela.

Entre os estudos na área de petróleo e gás, pode-se destacar o método para a tomada de decisão informada sobre o risco no contexto de gerenciamento de ativos físicos proposto por Syed e Lawryshyn (2020) e a avaliação de risco para transportadores de hidrato de gás natural realizada por Kim, Kang e Kim (2015).

Na indústria nuclear, French, Bedford e Atherton (2005) avaliaram a adequação da análise de custo-benefício e a teoria da utilidade multiatributo para realização de avaliações ALARP. No que se refere a área de processos, Naderpour, Lu e Zhang (2014a, 2014b) sugeriram uma abordagem de consciência de risco da situação para segurança de sistemas de processo, baseada na preocupação de que os tomadores de decisão enfrentam situações cada vez mais complexas e precisam evidenciar os riscos em meio a alta quantidade de dados fornecidos.

Figura 4 – Áreas de aplicação do ALARP



Fonte: A Autora (2021)

As publicações da área da saúde incluíam, especialmente, debates e experimentos sobre a redução das doses de radiação e receberam uma boa colocação na Figura 4. Todavia, com a leitura dos trabalhos percebeu-se que a maioria não detalhava a aplicação do ALARP, apenas citava rapidamente que a exposição à radiação deveria ser tão baixa quanto razoavelmente praticável (ALARP).

Em paralelo com o setor da saúde, outros ramos apenas citavam o ALARP ou a manutenção de equipamentos sem englobar aplicações e discussões densas sobre os dois termos ou sem aplicá-los em conjunto. Por esse motivo, uma nova triagem foi realizada nos artigos e com a nova filtragem a revisão foi embasada em 41 trabalhos.

Vale salientar que os trabalhos rejeitados nessa etapa possuem contribuições importantes para outras áreas de interesse. Todavia, como a presente revisão da literatura se limita aos trabalhos que relacionam ALARP e gestão da manutenção, os outros 101 trabalhos precisaram ser eliminados.

Com a nova filtragem, no que diz respeito ao tipo de contribuição, 13 trabalhos tratavam da proposição de método, metodologia ou modelo, 3 objetivavam o desenvolvimento de *frameworks*, 6 foram referentes à aplicação de análise/avaliação de risco e os demais estavam divididos entre visões gerais, discussões em torno do ALARP e outros.

### 6.1.5 Questão 2

A questão 2 foi “Como o ALARP é integrado na manutenção de equipamentos?”. O Quadro 4 traz um resumo dos trabalhos que apresentaram uma relação mais próxima entre gestão da manutenção e o princípio ALARP, dentre estes, os artigos de Zhang, Qin e Wang (2018), Thodi, Khan e Haddara (2013) e Flage (2013) destacam-se por modelarem políticas de manutenção com base no risco.

Zhang, Qin e Wang (2018) propõem 3 modelos de otimização que integram manutenção e ALARP: o modelo de valor de risco ideal com limitação de custo de manutenção, o modelo de custo de manutenção ideal com limitação de risco e o modelo de otimização abrangente aprimorado de custo total de manutenção de perda.

Thodi, Khan e Haddara (2013) apresentam uma estratégia de *Risk-Based Integrity Modeling* (RBIM) para definir intervalos ótimos de substituição ideais com base no custo e no risco. Flage (2013) propõe um modelo de substituição por idade baseado em ALARP. Entretanto, os trabalhos citados consideram que a ação de manutenção retorna o sistema ao estado tão bom quanto o novo.

Quadro 4 – Resumo dos artigos analisados sob a ótica do ALARP e da manutenção (continua)

Autor	Contribuição	Relação entre manutenção e ALARP
(FRENCH; BEDFORD; ATHERTON, 2005)	Argumenta-se que os Métodos de Utilidade Multiatributo ( <i>Multiple Attribute Utility Theory</i> - MAUT) fornecem uma metodologia alternativa ao CBA para apoiar a tomada de decisão ALARP, visto que o uso da CBA apresenta problemas e limitações.	Aponta como problema o fato dos critérios ALARP geralmente se basearem em um ano, enquanto as políticas de manutenção podem se estender por meses ou anos e o risco associado é diferente ao longo do tempo.
(NADERPOUR; LU; ZHANG, 2014a)	Propõe uma abordagem de consciência de risco da situação para segurança de sistemas de processo.	Defende que o sistema auxilia a evitar riscos imprevistos no sistema de operação e determinar formas adequadas de eliminar ou controlar os perigos para que o risco seja ALARP.
(NADERPOUR; LU; ZHANG, 2014b)	Apresenta um sistema de apoio à decisão baseado na cognição, denominado <i>Situation Awareness Support System</i> (SASS). O sistema é baseado na abordagem de Naderpour, Lu e Zhang (2014a) para gerenciar situações anormais em ambientes críticos para a segurança, nos quais o efeito da complexidade situacional nos tomadores de decisão humanos é uma preocupação.	A avaliação realizada pelo SASS pode apoiar a tomada de decisão de manutenção evitando acidentes. Isso é possível porque o SASS identifica o aumento do risco e sugere medidas para reduzi-lo.
(ZHANG; QIN; WANG, 2018)	Fornece um método quantitativo de tomada de decisão de manutenção de base no princípio ALARP para países com estatísticas insuficientes de informações de falha de gasodutos.	O ALARP combinado com a teoria de otimização é usado para discutir métodos de tomada de decisão de manutenção de dutos em regiões inaceitáveis e regiões ALARP. O artigo propõe três modelos de decisão de otimização e otimiza o modelo por meio do algoritmo de otimização por colônia de formigas ( <i>Ant Colony Optimization</i> - ACO).
(FLAGE, 2013)	Aborda a relação entre modelagem de otimização de manutenção e gerenciamento de risco de segurança. Implementa o ALARP em combinação com critérios de aceitação de risco no contexto da otimização de manutenção.	Apresenta um modelo de substituição por idade baseado no ALARP e nos critérios de aceitação de risco.
(THODI; KHAN; HADDARA, 2013)	Desenvolve um modelo de integridade baseado em risco para a substituição ideal de componentes de processo <i>offshore</i> , com base na probabilidade e consequência de falha decorrente de mecanismos de degradação dependentes do tempo.	Discute uma estratégia de <i>Risk-Based Integrity Modeling</i> (RBIM) para decisões de intervalos de substituição ideais de componentes de processo offshore.
(IFEZUE; TOBINS, 2015)	Descreve o processo de identificação de ameaças e avaliação de riscos associados, e apresenta as principais atividades necessárias para manter a integridade do <i>Gas Export Manifold</i> (GEM) durante sua vida operacional. O plano de gerenciamento de integridade descrito é projetado para que o risco seja ALARP.	Baseado na avaliação de risco realizada, são discutidas ações de manutenção que contribuem para que o risco seja mitigado.

Fonte: A Autora (2021)

As demais pesquisas não expuseram uma relação direta entre ALARP e manutenção, apenas assinalavam que a manutenção pode influenciar na segurança e confiabilidade do sistema ou ponderam que os custos de manutenção foram ou devem ser considerados nas abordagens propostas. O Quadro 5 traz um resumo dessa divisão.

Quadro 5 – Resumo dos artigos analisados sob a ótica do risco e da manutenção

Artigo	Abordagem da manutenção
<ul style="list-style-type: none"> <li>• (BRYANT; CROFT; COLE, 2018)</li> <li>• (NATALIZIO; PORFIRI; PATEL, 2005)</li> <li>• (CASSON MORENO <i>et al.</i>, 2016)</li> <li>• (ROUT; SIKDAR, 2017)</li> <li>• (HUANG; MA; LI, 2017)</li> <li>• (LEE, 2006)</li> <li>• (ZECHERU; LAMBRESCU, 2017)</li> <li>• (RUUD; MIKKELSEN, 2008)</li> <li>• (LIND, 2014)</li> <li>• (GHARABAGH <i>et al.</i>, 2009)</li> <li>• (MOHAMMADFAM; ZAREI, 2015)</li> <li>• (KIM; KANG; KIM, 2015)</li> <li>• (TAYLOR, 2016)</li> <li>• (AVEN, 2009)</li> <li>• (BROWN <i>et al.</i>, 2014)</li> <li>• (KLETZ, 2005)</li> <li>• (BRENNAN <i>et al.</i>, 2003)</li> <li>• (WAGNER-GILLEN, 2019)</li> <li>• (OVERFIELD; COLLINS, 2000)</li> <li>• (FIORENTINI <i>et al.</i>, 2018)</li> <li>• (BROWN, E. T., 2017)</li> <li>• (JAHANIAN, 2017)</li> <li>• (LIU <i>et al.</i>, 2020)</li> </ul>	<p>Apontam que atividades de manutenção contribuem para a redução de risco, afirmam que erros de manutenção são possíveis causas de falhas severas e/ou relatam as consequências de falhas durante as ações de manutenção.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• (NOH; CHANG, 2019)</li> <li>• (ASHIOFU; BRUCE-BLACK; DYER, 2020)</li> <li>• (HOPKIN; FU; VAN COILE, 2021)</li> <li>• (SYED; LAWRYSHYN, 2020)</li> <li>• (JAHANIAN; MAHBOOB, 2016)</li> <li>• (GUARIN; KONOVESSIS; VASSALOS, 2009)</li> <li>• (NESTICÒ <i>et al.</i>, 2018)</li> <li>• (SANCHEZ-SILVA; ARROYO, 2005)</li> <li>• (MAHBOOB <i>et al.</i>, 2015)</li> <li>• (NUÑEZ-SANCHEZ <i>et al.</i>, 2020)</li> <li>• (VAN COILE; JOMAAS; BISBY, 2019)</li> </ul>	<p>Mencionam que os custos de manutenção foram considerados no modelo, na metodologia ou <i>framework</i> desenvolvido.</p>

Fonte: A Autora (2021)

Diante dos 206 artigos identificados, 142 foram selecionados por se enquadrar nos critérios da revisão e por mencionar, estudar ou aplicar o princípio ALARP, sendo que, apenas 41 relacionaram, mesmo que indiretamente, a gestão da manutenção e a gestão de risco.

Dentre os 41 trabalhos mencionados acima, 56% apontaram para a interpretação de que a gestão da manutenção impacta na gestão do risco, 27% trataram da gestão de risco e declararam que os custos de manutenção foram considerados em suas propostas e 17% apresentaram uma relação mais próxima entre políticas de manutenção e risco. Destes 17%, apenas 3 trabalhos modelaram políticas de manutenção baseadas no risco.

Tendo em conta as funções estratégicas da gestão da manutenção e da gestão de risco, a estreita relação entre essas duas áreas e a necessidade de melhor compreensão sobre as implicações do planejamento conjunto de suas atividades, torna-se importante que tais temas sejam explorados associadamente.

## 6.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou as etapas e os principais resultados da revisão da literatura que se concentrou em responder quais as principais áreas de aplicação do ALARP e como tem se dado a sua utilização no contexto da gestão de manutenção. Percebeu-se um comportamento crescente de publicações ao longo dos últimos anos e que a maioria das publicações se concentraram em periódicos com foco em segurança e confiabilidade.

Reino Unido, China e Noruega apresentaram maior número de publicações. Além disso, a indústria de petróleo e gás, a indústria nuclear e a indústria de processos apresentaram uma quantidade considerável de trabalhos. Foi encontrada uma quantidade pouco expressiva de trabalhos que tratavam diretamente a otimização da manutenção e o princípio ALARP, sendo uma lacuna na literatura a presença de modelos e políticas de manutenção que englobem ALARP em conjunto com manutenção imperfeita.

Desta forma, percebe-se a oportunidade de pesquisas referentes aos critérios de aceitação de risco do ALARP aplicados a políticas de manutenção imperfeita para analisar o impacto da qualidade da ação de manutenção no índice de risco, e consequentemente, no custo ótimo de substituição de sistemas.

## 7 MODELO PROPOSTO

Como demonstrado no capítulo anterior, existe uma lacuna na literatura para desenvolvimento de modelos de otimização de manutenção que incorporem a gestão de risco. Tendo em vista esta lacuna e a necessidade de se considerar as incertezas presentes nas ações de manutenção, este capítulo propõe um modelo de substituição por idade baseado em reparo imperfeito bayesiano com implementação do princípio ALARP, em combinação com critérios de aceitação de risco.

Para tanto, fundamentou-se na política de substituição por idade baseada em reparo imperfeito bayesiano proposta por Lim, Qu e Zuo (2016) e houve a inserção do princípio ALARP, proposta por Flage (2013). O modelo abordou o caso do horizonte infinito e o caso de um ciclo de substituição considerando situações com e sem o uso do fator de desproporção no ALARP.

O Quadro 6 apresenta os atributos escolhidos para a composição do modelo e seus principais aspectos.

Quadro 6 – Características do modelo proposto

Considerações do modelo	Características
Substituição por idade	A substituição depende da idade do item. Sua vantagem, quando comparada com a substituição por intervalo, é que o tempo calculado zera quando há uma substituição por falha (BARLOW; PROSCHAN, 1965; BARLOW; HUNTER, 1960). Assim, não há possibilidade de uma substituição planejada logo após uma substituição por falha.
Reparo imperfeito	A restauração do item se encontra entre a situação AGAN e ABAO (PHAM; WANG, 1996). Abordagem realista por refletir as incertezas durante ações de manutenção.
Reparo imperfeito bayesiano	A qualidade da ação de manutenção é uma variável aleatória conduzida por uma distribuição de probabilidade (LIM; QU; ZUO, 2016). Engloba informações adquiridas antes do evento acontecer.
Horizonte de planejamento infinito	Indicado para situações estáveis ao longo do tempo. Os ciclos de manutenção são repetitivos e idênticos a cada renovação (KOBACZY; MURTHY, 2008).
Horizonte de planejamento finito	Os ciclos de manutenção podem ser diferentes do ponto de vista estocástico e econômico (KOBACZY; MURTHY, 2008).
ALARP e fator de desproporção	A definição de critérios de aceitação do ALARP contribuem para que os resultados selecionados apresentem um risco tão baixo quanto razoavelmente praticável, favorecendo a segurança. O uso do fator de desproporção assume o VPF crescente na região ALARP FLAGE (2013).

Fonte: A Autora (2021)

## 7.1 NOTAÇÃO

Utilizou-se a seguinte notação para a construção do modelo.

$X$	Vida útil do sistema.
$F(t), f(t), r(t)$	Função de distribuição acumulada, função densidade de probabilidade e a taxa de falha de $X$ , respectivamente.
$T$	Idade para substituição planejada.
$p_A$	Probabilidade de ocorrer o acidente $A$ devido a falha.
$PLL_A$	Perda de Vida Potencial devido ao acidente $A$ , ou seja, número esperado de mortes.
$v$	Valor de uma Fatalidade Evitada (VPF).
$C_s$	Custo de segurança.
$C'_p, C'_m, C'_r$	Custos de reparo perfeito devido à falha, reparo não perfeito devido à falha e substituição, respectivamente.
$C_p, C_m, C_r$	Custos de reparo perfeito, reparo não perfeito e substituição, respectivamente, ao considerar o custo devido à falha e o custo de segurança.
$P$	Variável aleatória representando a probabilidade de reparo perfeito.
$N(t), L(t), M(t)$	Número de falhas, número de reparos perfeitos e número de reparos não perfeitos em $(0, t)$ , respectivamente.
$Y_1$ e $Z_1$	Tempos de espera nos quais ocorrem o primeiro reparo perfeito e o primeiro reparo não perfeito, respectivamente.
$H(t)$ e $G(t)$	Função de distribuição acumulada de $Y_1$ e $Z_1$ , respectivamente.
$r_H(t)$ e $r_G(t)$	Taxa de falha de $Y_1$ e $Z_1$ , respectivamente.
$Y_1^*$	Duração entre duas renovações sucessivas do sistema.
$C_1^*$	Custo total incorrido durante o intervalo de renovação.

$R(T)$	Limite superior do PLL, aproximação do índice de risco.
$d(R(T))$	Fator de desproporção.
$B(T)$	Custo esperado de longo prazo por unidade de tempo.
$W(T)$	Custo total por unidade de tempo entre duas substituições sucessivas

## 7.2 PRESSUPOSTOS DO MODELO

Os seguintes pressupostos foram adotados:

- Os tempos de falha do equipamento podem ser modelados por uma função de densidade de probabilidade conhecida  $f(t)$  com taxa de falha crescente;
- O componente admite apenas dois estados, falho ou operacional;
- A falha do sistema é identificada imediatamente;
- O tempo para realizar uma substituição é considerado desprezível;
- Apenas uma pessoa seja exposta ao risco relacionado à manutenção do sistema em questão ou que todos os indivíduos do grupo estão expostos a um risco homogêneo;
- O sistema é renovado na idade  $T$  ou na primeira falha perfeitamente reparada, o que ocorrer primeiro, de forma que o procedimento é repetido após a substituição.

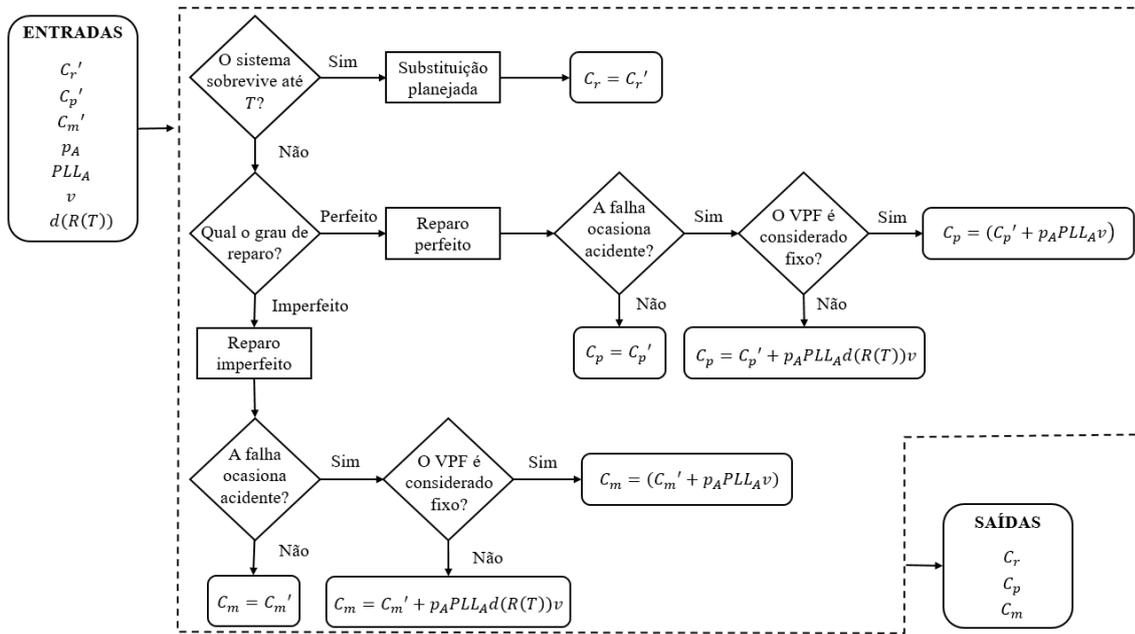
## 7.3 POLÍTICA DE SUBSTITUIÇÃO POR IDADE

Assume-se que a organização possui  $k$  pessoal de reparo, com diferentes habilidades de reparo. Com isso, a probabilidade de reparo perfeito varia aleatoriamente em virtude das habilidades do colaborador que realizará o reparo e possui uma distribuição de probabilidade com a seguinte função massa de probabilidade.

$$P(P = p_i) = \pi_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, k \quad (4.1)$$

Os custos utilizados no modelo foram definidos de acordo com o esquema ilustrado no Fluxograma 2. Como entrada tem-se os custos fixos de manutenção e os parâmetros referentes a gestão de risco. Os custos decorrentes para a substituição, o reparo perfeito e o reparo imperfeito são obtidos de acordo com o grau de reparo, a possível ocorrência do acidente e a abordagem utilizada para o Valor de Prevenir uma Fatalidade (*Value of a Prevented Fatality* – VPF).

Fluxograma 2 – Composição dos custos do modelo



Fonte: A Autora (2021)

O custo da substituição preventiva,  $C_r = C_r'$ , diz respeito ao custo de substituir o sistema na idade programada,  $T$ .

O custo esperado de segurança,  $C_s$ , é considerado quando a falha resulta um acidente  $A$ . Ao admitir que o VPF é fixo,  $C_s$  é composto pela multiplicação da probabilidade de ocorrência do acidente devido a falha ( $p_A$ ), o número esperado de mortes ( $PLL_A$ ) e o Valor de Prevenir uma Fatalidade ( $v$ ).

Ao abordar que o VPF é crescente na região ALARP, o fator de desproporção bruta,  $d(R(T))$ , é inserido no valor do  $C_s$ . Tal fator é expresso da seguinte forma.

$$d(R(T)) = \begin{cases} 1, & y \leq r_0 \\ g(R(T)), & r_0 < y < r_1 \\ \infty, & y \geq r_1 \end{cases} \quad (4.2)$$

Sendo que,  $R(T)$  diz respeito ao índice de risco e seu valor pode ser uma aproximação do limite superior do PLL ao assumir que uma pessoa seja exposta ao risco relacionado à manutenção do sistema em questão, expresso pela Equação (4.3).

$$R(T) = \left[ F(T) \left( 1 + \left\lfloor \frac{u}{T} \right\rfloor \right) - F \left( T - \left( u - \left\lfloor \frac{u}{T} \right\rfloor T \right) \right) \right] p_A PLL_A \quad (4.3)$$

O custo do reparo perfeito,  $C_p$ , é o valor de substituir o sistema perfeitamente quando o sistema falha antes de  $T$ . Se não ocorrer acidente devido a falha (com probabilidade  $1 - p_A$ ),  $C_p$  será igual ao custo usual de reparo perfeito ( $C_p'$ ). Na situação em que ocorre o acidente  $A$  (com probabilidade  $p_A$ ),  $C_p$  será composto  $C_p'$  e o custo esperado de segurança ( $C_s$ ).

As Equações (4.4) e (4.5) apresentam a composição de  $C_p$  para o VPF fixo e crescente, respectivamente.

$$C_p = C_p' + p_A PLL_A v \quad (4.4)$$

$$C_p = C_p' + p_A PLL_A d(R(T))v \quad (4.5)$$

O custo de reparo imperfeito,  $C_m$ , trata-se do custo de reparar o sistema de maneira não perfeita. De modo semelhante ao custo de reparo perfeito, se a falha ocasiona um acidente,  $C_m$  será composto pelo custo fixo de reparo não perfeito ( $C_m'$ ) e  $C_s$ . O custo de reparo imperfeito é expresso pelas Equações (4.6) e (4.7) para o VPF fixo e crescente, respectivamente.

$$C_m = C_m' + p_A PLL_A v \quad (4.6)$$

$$C_m = C_m' + p_A PLL_A d(R(T))v \quad (4.7)$$

O número de falha em  $(0, t)$  é a soma do número de reparos perfeitos em  $(0, t)$  e do número de reparos não perfeitos em  $(0, t)$ . Ou seja,  $N(t) = L(t) + M(t)$ . De forma que,  $Y_1 = \{t \geq 0 | L(t) = 1\}$  é o tempo de espera em que o primeiro reparo perfeito ocorre e  $Z_1 = \{t \geq 0 | M(t) = 1\}$  é o tempo de espera em que o primeiro reparo não perfeito ocorre. Desta maneira,  $M(Y_1)$  diz respeito ao número de reparos não perfeitos em  $(0, Y_1]$  e, de acordo com Sheu et al. [1999],  $Y_1$  é independente de  $\{M(t), t \geq 0\}$ .

De acordo com Lim e Lu e Park (1998),  $\bar{H}(t) = P(Y_1 \geq t) = \sum_{i=1}^k \bar{F}^{p_i}(t)\pi_i$  e  $\bar{G}(t) = P(Z_1 \geq t) = \sum_{i=1}^k \bar{F}^{(1-p_i)}(t)\pi_i$ . Ademais,  $\{L(t), t \geq 0\}$  e  $\{M(t), t \geq 0\}$  são processos de Poisson Não-Homogêneos (*Non-Homogeneous Poisson Process* - NHPP) com as respectivas funções de intensidade (LIM; QU; ZUO, 2016):

$$r_H(t) = r(t) \frac{A(t,1)}{A(t,0)} \quad (4.8)$$

$$r_G(t) = r(t) \frac{Z(t,1)}{Z(t,0)} \quad (4.9)$$

Sendo que,  $A(t, n) = \sum_{i=1}^k p_i^n \bar{F}^{pi}(t) \pi_i$  e  $Z(t, n) = \sum_{i=1}^k (1 - p_i)^n \bar{F}^{(1-p_i)}(t) \pi_i$ . Além disso,  $r_H(t)$  e  $r_G(t)$  são as funções de taxa de falha de H e G, respectivamente. A seguir serão apresentados os casos do horizonte infinito e de um ciclo de substituição fundamentados em Lim, Qu e Zuo (2016) e estendidos para a situação em que os critérios de aceitação de risco do princípio ALARP são considerados.

### 7.3.1 Custo esperado por unidade de tempo

O custo esperado por unidade de tempo foi modelado tanto para o horizonte de planejamento infinito quanto para o caso de um ciclo de substituição.

#### 7.3.1.1 Caso do horizonte infinito

Ao propor que  $Y_1, Y_2, \dots$  são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) de  $H(y)$ , o tempo de duração entre duas renovações consecutivas do sistema é indicado por  $Y_i^* = \min(Y_i, T)$  para  $i = 1, 2, \dots$  conforme descrito na Equação (4.10).

$$Y_i^* = Y_i I_{(0,T)}(Y_i) + T I_{(T,\infty)}(Y_i) \quad (4.10)$$

A primeira parcela da Equação (4.10) corresponde ao tempo de espera para realização do  $i$ -ésimo reparo perfeito e a probabilidade do sistema falhar antes de  $T$ . A segunda parcela é composta pela idade  $T$  e a probabilidade do sistema sobreviver até  $T$ . Assim, o valor esperado de  $Y_i^*$  é igual a (LIM; QU; ZUO, 2016):

$$E(Y_i^*) = \int_0^T t dH(t) + T \bar{H}(T) = \int_0^T \bar{H}(t) dt \quad (4.11)$$

Por sua vez, o custo total incorrido durante o intervalo de renovação  $Y_i^*$  para  $i = 1, 2, \dots, Y_i^*$  é obtido pela Equação (4.12).

$$C_i^* = [C_p + C_m M(Y_i)] I_{(0,T)}(Y_i) + [C_r + C_m M(T)] I_{(T,\infty)}(Y_i) \quad (4.12)$$

A primeira parcela da Equação (4.12) é composta pela probabilidade do sistema falhar antes de  $T$  e ser reparado perfeitamente, o custo do reparo perfeito ( $C_p$ ) e os custos dos reparos não perfeitos que ocorreram até a realização do primeiro reparo perfeito, ou seja, o valor despendido em um reparo não perfeito ( $C_m$ ) multiplicado pela quantidade de reparos não perfeitos realizados no intervalo.

Na segunda parcela encontra-se a probabilidade do sistema sobreviver até  $T$  e o custo decorrente da substituição ( $C_r$ ), além disso são considerados os custos dos reparos não

perfeitos que ocorreram até a idade  $T$ . Desta forma, o custo esperado para operar o sistema quando o VPF é fixo é igual a Equação (4.13).

$$E(C_1^*) = (C'_m + p_A PLL_A v) \int_0^T \bar{H}(t) r_G(t) dt + (C'_p + p_A PLL_A v) H(T) + C'_r \bar{H}(T) \quad (4.13)$$

De maneira semelhante, quando o VPF é crescente o custo esperado de operação do sistema é definido pela Equação (4.14).

$$E(C_1^*) = \left[ C'_m + p_A PLL_A d(R(T)) v \right] \int_0^T \bar{H}(t) r_G(t) dt + \left[ C'_p + p_A PLL_A d(R(T)) v \right] H(T) + C'_r \bar{H}(T) \quad (4.14)$$

Note que,  $\{(Y_1^*, C_1^*)\}$  compõem um processo de renovação, no qual a renovação ocorre quando há substituição ou reparo perfeito. Seja  $K(t)$  o custo esperado para operar o sistema durante o intervalo de tempo  $[0, t]$ , de acordo com o Teorema da Renovação com Recompensa (ROSS, 2010):

$$B(T) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{K(t)}{t} = \frac{E(C_1^*)}{E(Y_1^*)} \quad (4.15)$$

Diante do exposto, ao considerar o VPF fixo, o custo total incorrido durante o intervalo de renovação é obtido pela divisão do custo incorrido no intervalo de renovação pela duração do intervalo, como apresentado na Equação (4.16).

$$B(T) = \frac{(C'_m + p_A PLL_A v) \int_0^T \bar{H}(t) r_G(t) dt + (C'_p + p_A PLL_A v) H(T) + C'_r \bar{H}(T)}{\int_0^T \bar{H}(t) dt} \quad (4.16)$$

Quando o custo total incorrido durante o intervalo de renovação considera o VPF é crescente obtém-se a Equação (4.17).

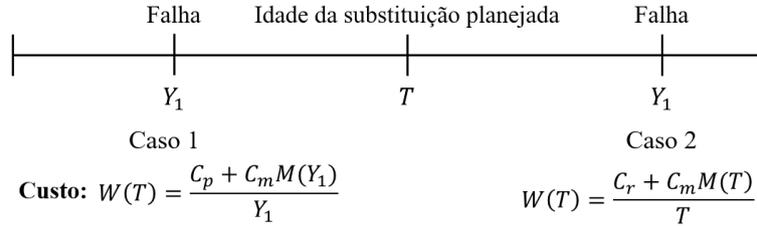
$$B(T) = \frac{\left[ C'_m + p_A PLL_A d(R(T)) v \right] \int_0^T \bar{H}(t) r_G(t) dt + \left[ C'_p + p_A PLL_A d(R(T)) v \right] H(T) + C'_r \bar{H}(T)}{\int_0^T \bar{H}(t) dt} \quad (4.17)$$

Assim, o objetivo é encontrar a idade de substituição que minimize o custo esperado de longo prazo,  $B(T)$ , e que cumpra os critérios de aceitação de risco, isto é,  $R(T)$  seja menor que  $r_1$ .

### 7.3.1.2 Caso de um ciclo de substituição

Ao trabalhar com apenas um ciclo de substituição, será analisado o custo esperado por unidade de tempo do referido ciclo. Observa-se na Figura 5 que um ciclo pode ser delimitado pelo acontecimento de falhas antes ou depois da idade  $T$ .

Figura 5 – Possíveis falhas em um ciclo e os concernentes custos por unidade de tempo



Fonte: Lim, Qu e Zuo (2016)

Assim, o custo total por unidade de tempo entre duas substituições sucessivas quando a substituição planejada for executada na idade  $T$ ,  $W(T)$ , é igual a:

$$W(T) = \left( \frac{C_p + C_m M(Y_1)}{Y_1} \right) I_{(0,T)}(Y_i) + \left( \frac{C_r + C_m M(T)}{T} \right) I_{(T,\infty)}(Y_i) \quad (4.18)$$

Usando a independência de  $Y_1$  e  $\{M(t), t \geq 0\}$ , o valor esperado de  $W(T)$  é (LIM; QU; ZUO, 2016):

$$E[W(T)] = E \left[ I_{(0,T)}(Y_1) \left( \frac{C_p + C_m M(Y_1)}{Y_1} \right) \right] + E \left[ I_{(T,\infty)}(Y_i) \left( \frac{C_r + C_m M(T)}{T} \right) \right] \quad (4.19)$$

$$E[W(T)] = C_p \int_0^T \frac{1}{t} dH(t) + \frac{C_r \bar{H}(T)}{T} + \frac{C_m \int_0^T r_G(t) dt}{T} - C_m \int_0^T \left[ \frac{H(t)}{t} r_G(t) - \frac{1}{t} \int_0^t r_G(z) dz \right] dt \quad (4.20)$$

A Equação (4.21) apresenta o valor esperado de  $W(T)$  quando o VPF é fixo.

$$E[W(T)] = (C'_p + p_A PLL_A \nu) \int_0^T \frac{1}{t} dH(t) + \frac{C_r \bar{H}(T)}{T} + \frac{(C'_m + p_A PLL_A \nu) \int_0^T r_G(t) dt}{T} - (C'_m + p_A PLL_A \nu) \int_0^T \left[ \frac{H(t)}{t} r_G(t) - \frac{1}{t} \int_0^t r_G(z) dz \right] dt \quad (4.21)$$

Para o caso do VPF crescente, o valor esperado de  $W(T)$  é expresso pela Equação (4.22).

$$\begin{aligned}
E[W(T)] = & \left[ C'_p + p_A PLL_A d(R(T))v \right] \int_0^T \frac{1}{t} dH(t) + \frac{C_r \bar{H}(T)}{T} + \frac{\left[ C'_m + p_A PLL_A d(R(T))v \right] \int_0^T r_G(t) dt}{T} \\
& - \left[ C'_m + p_A PLL_A d(R(T))v \right] \int_0^T \left[ \frac{H(t)}{t} r_G(t) - \frac{1}{t} \int_0^t r_G(z) dz \right] dt
\end{aligned} \tag{4.22}$$

O objetivo é encontrar a idade de substituição que minimize o custo esperado de longo prazo,  $E[W(T)]$ , e que cumpra os critérios de aceitação de risco, isto é,  $R(T)$  seja menor que  $r_1$ .

#### 7.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou a proposta do modelo de substituição por idade baseado em reparo imperfeito bayesiano com implementação do princípio ALARP, em combinação com critérios de aceitação de risco. Foram expostas as equações do custo esperado por unidade de tempo para o horizonte de planejamento infinito e para um ciclo de substituição, em ambos os casos foi considerado tanto o VPF fixo quanto crescente.

A consideração do reparo imperfeito em conjunto com os critérios de aceitação de risco mostra-se relevante por contribuir para a elaboração de programações de manutenção mais realistas e conservadoras, uma vez que nem todas as ações de manutenção reparam o sistema perfeitamente e a inserção do princípio ALARP colabora para monitoração da exposição ao risco em função da qualidade da ação de manutenção e do tempo.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo demonstra a aplicação numérica do modelo proposto e a interpretação destes resultados. Com isso, objetiva-se ilustrar o caráter prático da implementação do princípio ALARP em um modelo de substituição por idade baseado em reparo imperfeito bayesiano.

A aplicação numérica compreende os casos com um e dois pontos *a priori*, além disso, são apresentadas as equações para a modelagem de quatro pontos *a priori*. Para a modelagem dos casos fez-se uso da linguagem de programação Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2020).

Seja  $F$  uma distribuição *Weibull* com parâmetro de escala  $\theta = 1$ , parâmetro de forma  $\beta > 0$  e seja  $t \geq 0$ . De acordo com a proposta de Lim, Qu e Zuo (2016), tem-se as seguintes equações.

$$r(t) = \beta t^{\beta-1} \quad (5.1)$$

$$\bar{H}(T) = \sum_{i=1}^k e^{-p_i t^\beta} \cdot \pi_i \quad (5.2)$$

$$h(t) = \sum_{i=1}^k \beta p_i t^{\beta-1} e^{-p_i t^\beta} \cdot \pi_i \quad (5.3)$$

$$r_H(t) = \beta t^{\beta-1} \frac{\sum_{i=1}^k p_i e^{-p_i t^\beta} \cdot \pi_i}{\sum_{i=1}^k e^{-p_i t^\beta} \cdot \pi_i} \quad (5.4)$$

$$r_G(t) = \beta t^{\beta-1} \frac{\sum_{i=1}^k (1 - p_i) e^{-(1-p_i)t^\beta} \cdot \pi_i}{\sum_{i=1}^k e^{-(1-p_i)t^\beta} \cdot \pi_i} \quad (5.5)$$

### 8.1 UM PONTO A PRIORI

Para fins ilustrativos, foram definidos tanto para o caso do horizonte infinito quanto para o caso de um ciclo de substituição:

$C'_r$	$C'_p$	$C'_m$	$\nu$	$p_A$	$PLL_A$	$\beta$	$\theta$	$p_1$	$r_0$	$r_1$	$u$
1	2	0.25	100	0.1	0.01	2	1	0.9	$10^{-5}$	$10^{-3}$	1

Os critérios de aceitação foram definidos de acordo com os valores sugeridos pela *Society for Risk Analysis* (SRA). Os parâmetros da *Weibull* representam um sistema com padrão de desgaste igual a 2 e com vida característica igual a 1. As proporções delineadas para os

valores dos custos de manutenção e dos parâmetros de risco visam retratar a realidade de sistemas produtivos com probabilidade de ocorrência de acidente devido a falha.

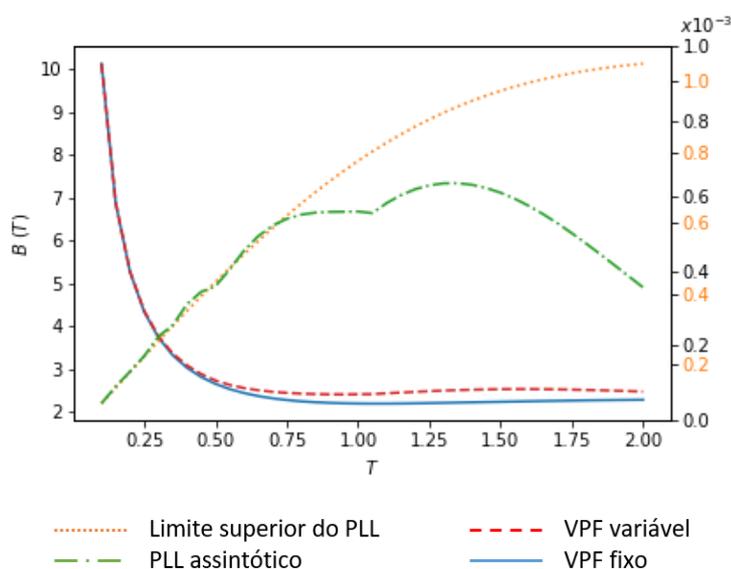
### 8.1.1 Caso do horizonte infinito

No contexto de um ponto *a priori* admite-se que  $P = p_1$  com probabilidade 1, para o horizonte infinito, foram aplicadas as Equações (4.16) e (4.17) para obtenção do custo esperado de longo prazo por unidade de tempo. Para o caso do VPF fixo os valores de  $C_p$  e  $C_m$  foram definidos pelas Equações (4.4) e (4.6), ao passo que, as Equações (4.5) e (4.7) foram utilizadas para expressar o caso do VPF crescente.

A Figura 6 apresenta o custo esperado de longo prazo para o VPF fixo (linha azul) e o VPF crescente (linha vermelha) para  $p = 0.9$ . Ao se considerar o VPF fixo, a idade ótima de substituição é  $T^* = 1.05$ , sendo o menor custo de longo prazo igual a 2.185. Ao passo que, ao se empregar o VPF crescente, a idade ideal de substituição é  $T^* = 0.95$  e o menor custo de longo prazo é igual a 2.400.

Percebe-se que o caso que se baseia no VPF crescente apresenta uma idade ideal de substituição menor, enquanto o custo de substituição de longo prazo é maior. Tal situação ocorre porque o fator de desproporção se torna maior ao longo do tempo, ocasionando o crescimento do índice de risco e do custo, por isso, torna-se mais conservador substituir o equipamento em uma idade menor.

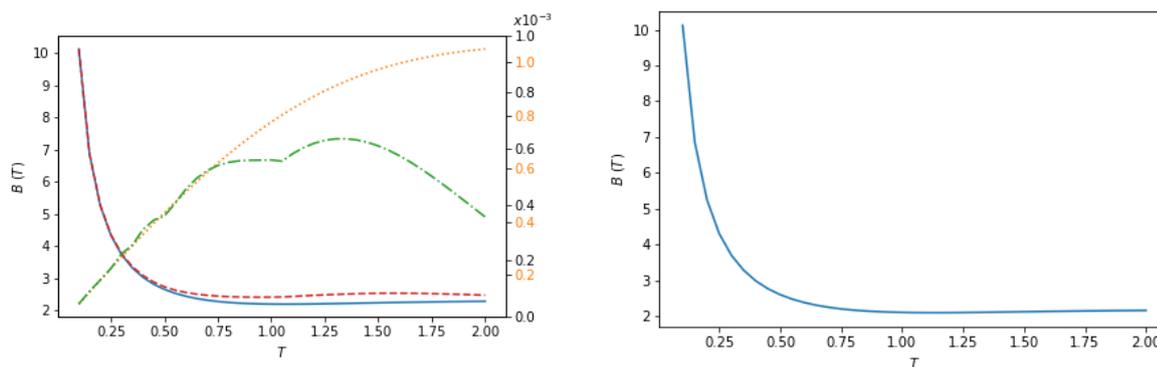
Figura 6 – Custo esperado de longo prazo para  $\beta = 2$



Fonte: A Autora (2021)



Figura 8 – Custo esperado de longo prazo com e sem ALARP



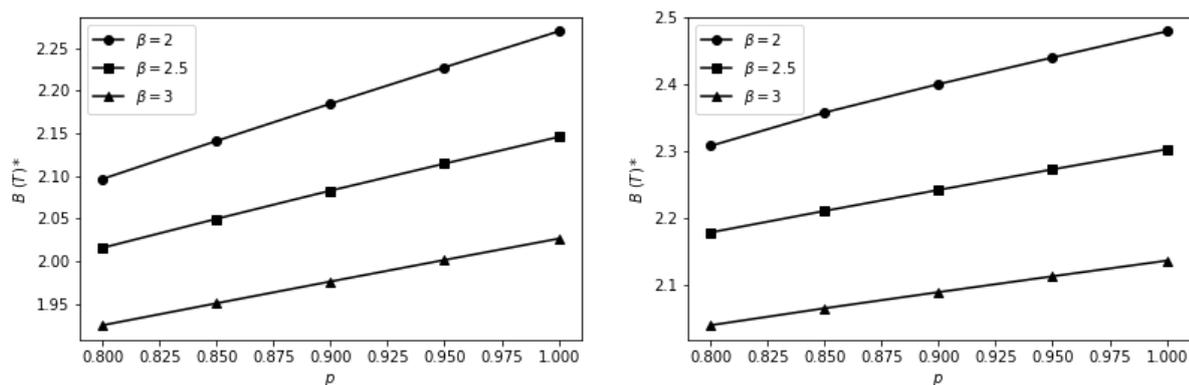
(a) Com ALARP

(b) Sem ALARP

..... Limite superior do PLL      - - - VPF variável  
- . - . PLL assintótico                      — VPF fixo

Fonte: A Autora (2021)

Na Figura 9a observa-se o custo ótimo de longo prazo para diferentes valores de  $p$  ao se analisar o VPF fixo quando  $\beta = 2$ ,  $\beta = 2.5$  e  $\beta = 3$ . Constata-se que, nos três casos, o custo ótimo de longo prazo aumenta quando  $p$  aumenta, ou seja, quando o reparo tende a ser perfeito. A maior probabilidade de reparo ser perfeito acarreta em mais despesas, porque o custo de tal reparo é mais caro do que o custo de substituição. Desta forma, conforme exposto na Tabela 2, a idade ótima de substituição diminui à medida que  $p$  aumenta, visto que é mais econômico substituir antes da falha.

Figura 9 – Custo ótimo de longo prazo para diferentes valores de  $p$ 

(a) VPF fixo

(b) VPF crescente

Fonte: A Autora (2021)

Além disso, nota-se que o custo ótimo de longo prazo diminui quando o padrão de desgaste do sistema aumenta. Dado que o custo de reparo não perfeito é menor do que o custo

de reparo perfeito, torna-se mais econômico a realização do reparo não perfeito à medida que  $\beta$  cresce, isso faz com que o custo ótimo de longo prazo diminua.

A Figura 9b traz informações similares as apresentadas na Figura 9a, desta feita para a situação em que o VPF é crescente. É possível observar que o custo ótimo de longo prazo também aumenta quando  $p$  aumenta e diminui quando  $\beta$  aumenta.

Tabela 2 – Resultados para um ponto a priori (continua)

$\beta$	$T$	$p = 0.8$				$p = 0.9$				$p = 1$			
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL
	<b>0.50</b>	2.5935	2.6689	0.3869	0.3960	2.6446	2.7246	0.4334	0.4211	2.6954	2.7791	0.4795	0.4424
	<b>0.55</b>	2.4677	2.5559	0.4226	0.4235	2.5231	2.6205	0.4730	0.4686	2.5782	2.6843	0.5229	0.5121
	<b>0.60</b>	2.3712	2.4786	0.4574	0.4752	2.4308	2.5483	0.5115	0.5216	2.4900	2.6168	0.5649	0.5654
	<b>0.65</b>	2.2970	2.4230	0.4914	0.5176	2.3606	2.4967	0.5489	0.5623	2.4237	2.5688	0.6056	0.6031
	<b>0.70</b>	2.2400	2.3833	0.5244	0.5513	2.3074	2.4602	0.5852	0.5917	2.3741	2.5349	0.6449	0.6269
	<b>0.75</b>	2.1965	2.3558	0.5565	0.5769	2.2675	2.4348	0.6202	0.6112	2.3376	2.5111	0.6826	0.6392
	<b>0.80</b>	2.1636	2.3374	0.5874	0.5956	2.2379	2.4178	0.6538	0.6228	2.3112	2.4950	0.7188	0.6431
	<b>0.85</b>	2.1393	2.3260	0.6173	0.6088	2.2166	2.4072	0.6861	0.6286	2.2927	2.4849	0.7533	0.6416
	<b>0.90</b>	2.1218	2.3200	0.6460	0.6177	2.2019	2.4017	0.7170	0.6307	2.2806	2.4799	0.7861	0.6376
	<b>0.95</b>	2.1097	2.3185	0.6736	0.6239	2.1924	<b>2.4005</b>	0.7465	0.6312	2.2734	<b>2.4793</b>	0.8171	0.6337
<b>2</b>	<b>1.00</b>	2.1020	2.3207	0.6999	0.6286	2.1870	2.4031	0.7744	0.6317	2.2701	2.4828	0.8464	0.6321
	<b>1.05</b>	2.0979	<b>2.3082</b>	0.7250	0.5844	<b>2.1848</b>	2.4068	0.8009	0.6272	<b>2.2697</b>	2.5011	0.8739	0.6655
	<b>1.10</b>	<b>2.0966</b>	2.3249	0.7488	0.6138	2.1852	2.4245	0.8258	0.6554	2.2716	2.5195	0.8997	0.6919
	<b>1.15</b>	2.0974	2.3423	0.7713	0.6386	2.1876	2.4422	0.8492	0.6778	2.2752	2.5369	0.9236	0.7113
	<b>1.20</b>	2.1000	2.3597	0.7926	0.6587	2.1914	2.4591	0.8711	0.6945	2.2800	2.5528	0.9459	0.7239
	<b>1.25</b>	2.1039	2.3765	0.8126	0.6743	2.1963	2.4747	0.8915	0.7056	2.2856	2.5667	0.9664	0.7298
	<b>1.30</b>	2.1087	2.3923	0.8314	0.6853	2.2019	2.4885	0.9105	0.7112	2.2918	2.5782	0.9852	0.7294
	<b>1.35</b>	2.1143	2.4066	0.8488	0.6919	2.2080	2.5003	0.9279	0.7116	2.2982	2.5870	1.0024	0.7231
	<b>1.40</b>	2.1203	2.4192	0.8651	0.6942	2.2143	2.5098	0.9440	0.7071	2.3047	2.5932	1.0180	0.7113
	<b>1.45</b>	2.1265	2.4299	0.8802	0.6924	2.2207	2.5168	0.9587	0.6980	2.3111	2.5966	1.0321	0.6945
	<b>1.50</b>	2.1329	2.4385	0.8941	0.6868	2.2271	2.5215	0.9721	0.6847	2.3173	2.5974	1.0449	0.6734

Tabela 2 – Resultados para um ponto a priori (continuação)

$\beta$	$T$	$p = 0.8$				$p = 0.9$				$p = 1$			
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL
	<b>0.50</b>	2.4066	2.4467	0.2744	0.2994	2.4410	2.4830	0.3075	0.3142	2.4753	2.5185	0.3404	0.3241
	<b>0.55</b>	2.2841	2.3344	0.3140	0.3268	2.3233	2.3790	0.3516	0.3632	2.3621	2.4232	0.3887	0.3988
	<b>0.60</b>	2.1936	2.2616	0.3544	0.3897	2.2373	2.3121	0.3964	0.4303	2.2807	2.3618	0.4378	0.4690
	<b>0.65</b>	2.1275	2.2152	0.3955	0.4492	2.1758	2.2711	0.4417	0.4909	2.2235	2.3257	0.4872	0.5293
	<b>0.70</b>	2.0806	2.1893	0.4367	0.5030	2.1332	2.2496	0.4871	0.5423	2.1852	2.3079	0.5365	0.5764
	<b>0.75</b>	2.0488	<b>2.1789</b>	0.4780	0.5493	2.1056	<b>2.2424</b>	0.5322	0.5829	2.1615	<b>2.3032</b>	0.5853	0.6092
	<b>0.80</b>	2.0289	2.1802	0.5190	0.5873	2.0896	2.2456	0.5768	0.6123	2.1492	2.3074	0.6332	0.6283
	<b>0.85</b>	2.0186	2.1901	0.5594	0.6170	<b>2.0829</b>	2.2561	0.6205	0.6316	<b>2.1458</b>	2.3179	0.6798	0.6363
	<b>0.90</b>	<b>2.0158</b>	2.2061	0.5990	0.6390	2.0834	2.2717	0.6631	0.6426	2.1493	2.3328	0.7249	0.6367
	<b>0.95</b>	2.0189	2.2265	0.6376	0.6546	2.0893	2.2910	0.7041	0.6479	2.1578	2.3514	0.7681	0.6339
<b>2.5</b>	<b>1.00</b>	2.0266	2.2500	0.6748	0.6655	2.0995	2.3133	0.7434	0.6506	2.1700	2.3734	0.8091	0.6321
	<b>1.05</b>	2.0378	2.2475	0.7105	0.5946	2.1126	2.3326	0.7808	0.6378	2.1847	2.4129	0.8477	0.6763
	<b>1.10</b>	2.0514	2.2867	0.7444	0.6359	2.1277	2.3726	0.8160	0.6784	2.2010	2.4530	0.8836	0.7157
	<b>1.15</b>	2.0666	2.3268	0.7765	0.6735	2.1440	2.4124	0.8488	0.7143	2.2181	2.4919	0.9167	0.7492
	<b>1.20</b>	2.0829	2.3667	0.8066	0.7067	2.1609	2.4508	0.8792	0.7446	2.2352	2.5282	0.9470	0.7758
	<b>1.25</b>	2.0996	2.4052	0.8345	0.7351	2.1777	2.4867	0.9071	0.7687	2.2519	2.5609	0.9744	0.7949
	<b>1.30</b>	2.1162	2.4412	0.8603	0.7581	2.1941	2.5190	0.9324	0.7863	2.2678	2.5892	0.9989	0.8063
	<b>1.35</b>	2.1324	2.4741	0.8838	0.7756	2.2097	2.5472	0.9551	0.7971	2.2826	2.6124	1.0205	0.8098
	<b>1.40</b>	2.1478	2.5031	0.9051	0.7873	2.2242	2.5706	0.9753	0.8012	2.2961	2.6302	1.0394	0.8054
	<b>1.45</b>	2.1623	2.5279	0.9242	0.7932	2.2375	2.5891	0.9931	0.7984	2.3082	2.6424	1.0557	0.7935
	<b>1.50</b>	2.1756	2.5481	0.9412	0.7935	2.2495	2.6024	1.0086	0.7892	2.3189	2.6492	1.0696	0.7744

Tabela 2 – Resultados para um ponto a priori (conclusão)

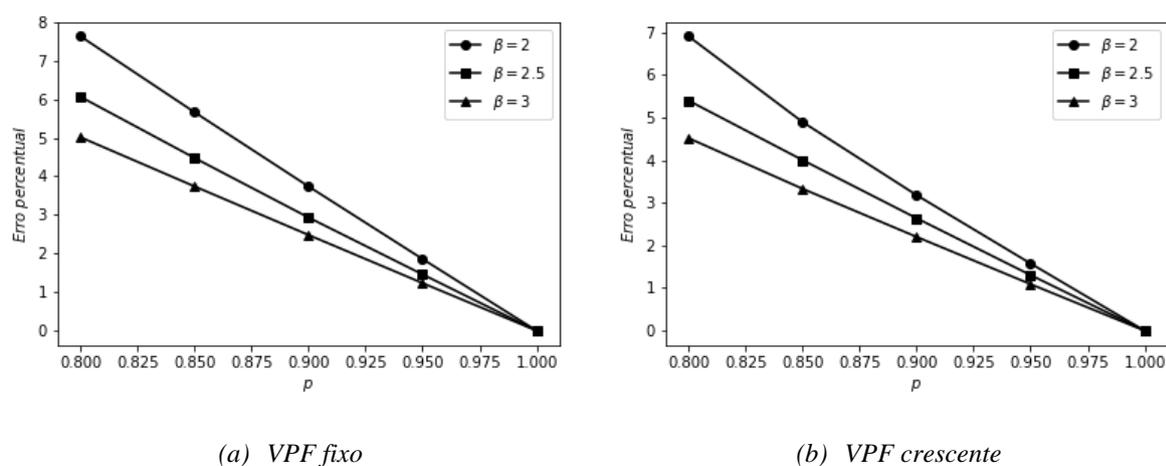
$\beta$	$T$	$p = 0.8$				$p = 0.9$				$p = 1$			
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL
	<b>0.50</b>	2.2815	2.3025	0.1951	0.2235	2.3052	2.3270	0.2188	0.2321	2.3288	2.3508	0.2423	0.2350
	<b>0.55</b>	2.1564	2.1846	0.2341	0.2487	2.1845	2.2160	0.2623	0.2774	2.2125	2.2472	0.2902	0.3055
	<b>0.60</b>	2.0658	2.1080	0.2758	0.3133	2.0986	2.1454	0.3087	0.3475	2.1311	2.1822	0.3411	0.3806
	<b>0.65</b>	2.0022	2.0621	0.3200	0.3808	2.0398	2.1053	0.3575	0.4185	2.0769	2.1477	0.3945	0.4536
	<b>0.70</b>	1.9602	2.0412	0.3661	0.4477	2.0025	<b>2.0897</b>	0.4084	0.4856	2.0443	<b>2.1367</b>	0.4499	0.5187
	<b>0.75</b>	1.9356	<b>2.0403</b>	0.4137	0.5109	1.9825	2.0931	0.4606	0.5448	2.0287	2.1434	0.5065	0.5709
	<b>0.80</b>	<b>1.9250</b>	2.0552	0.4624	0.5675	<b>1.9763</b>	2.1107	0.5137	0.5927	<b>2.0265</b>	2.1625	0.5636	0.6071
	<b>0.85</b>	1.9255	2.0819	0.5116	0.6153	1.9809	2.1382	0.5670	0.6280	2.0349	2.1897	0.6206	0.6274
	<b>0.90</b>	1.9350	2.1172	0.5608	0.6532	1.9940	2.1723	0.6198	0.6508	2.0513	2.2220	0.6766	0.6345
	<b>0.95</b>	1.9514	2.1580	0.6094	0.6812	2.0135	2.2104	0.6715	0.6632	2.0735	2.2577	0.7309	0.6338
<b>3</b>	<b>1.00</b>	1.9729	2.2020	0.6569	0.7006	2.0374	2.2509	0.7215	0.6693	2.0995	2.2962	0.7828	0.6321
	<b>1.05</b>	1.9979	2.2086	0.7026	0.6038	2.0643	2.2842	0.7691	0.6471	2.1276	2.3547	0.8317	0.6856
	<b>1.10</b>	2.0252	2.2681	0.7463	0.6547	2.0926	2.3437	0.8139	0.6974	2.1566	2.4134	0.8770	0.7348
	<b>1.15</b>	2.0534	2.3286	0.7872	0.7021	2.1212	2.4027	0.8553	0.7431	2.1851	2.4701	0.9183	0.7781
	<b>1.20</b>	2.0817	2.3880	0.8252	0.7449	2.1490	2.4590	0.8930	0.7830	2.2123	2.5227	0.9552	0.8144
	<b>1.25</b>	2.1091	2.4446	0.8599	0.7824	2.1754	2.5109	0.9268	0.8163	2.2373	2.5696	0.9877	0.8427
	<b>1.30</b>	2.1349	2.4967	0.8911	0.8138	2.1997	2.5570	0.9565	0.8421	2.2598	2.6095	1.0156	0.8622
	<b>1.35</b>	2.1587	2.5432	0.9187	0.8386	2.2214	2.5962	0.9823	0.8600	2.2794	2.6416	1.0392	0.8726
	<b>1.40</b>	2.1801	2.5831	0.9426	0.8564	2.2404	2.6279	1.0040	0.8698	2.2960	2.6655	1.0587	0.8737
	<b>1.45</b>	2.1989	2.6159	0.9631	0.8672	2.2565	2.6518	1.0221	0.8714	2.3098	2.6812	1.0744	0.8655
	<b>1.50</b>	2.2151	2.6413	0.9803	0.8708	2.2700	2.6679	1.0369	0.8649	2.3209	2.6890	1.0868	0.8483

Fonte: A Autora (2021)

Na Figura 10 são expostas as diferenças relativas entre os custos ótimos de longo prazo à medida que  $p$  varia. Nota-se que quanto mais a probabilidade de reparo perfeito se aproxima de 1, menor é o erro percentual do custo.

Por exemplo, ao se assumir  $p = 0.80$  e  $\beta = 2$ , o erro relativo é de 7.628% e 6.901% quando o VPF é fixo e crescente, respectivamente. Por outro lado, quando  $p = 0.90$  e  $\beta = 2$ , o erro relativo é de 3.738% e 3.178% quando o VPF é fixo e crescente, respectivamente. Para os outros valores de  $p$  e  $\beta$  o erro percentual também se mostra menor considerando o VPF crescente.

Figura 10 – Erro percentual do custo ótimo (horizonte infinito)



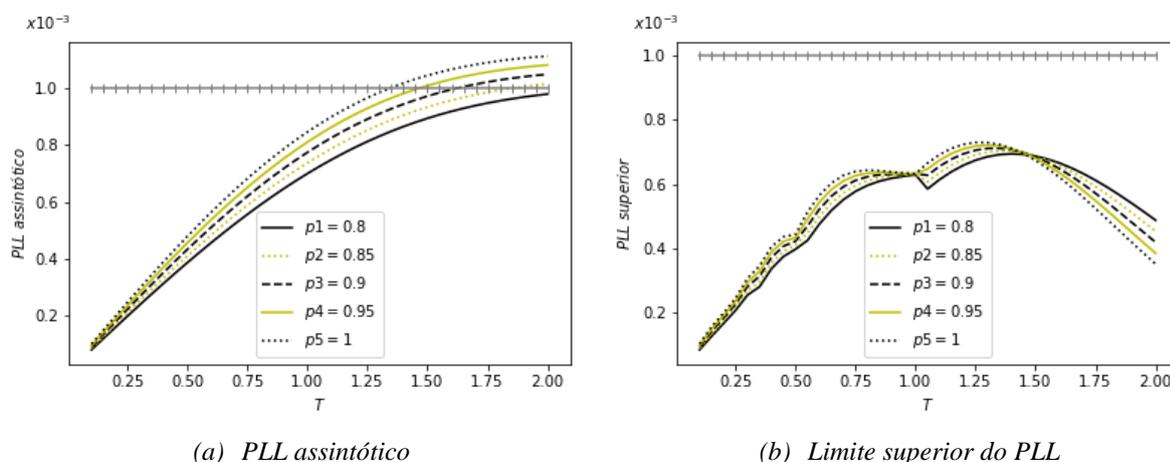
Fonte: A Autora (2021)

A Figura 11 apresenta as curvas do PLL assintótico e do limite do PLL para diferentes valores de  $p$  e  $\beta = 2$ , apontando que tanto o PLL assintótico quanto o limite superior do PLL aumentam quando  $p$  aumenta. Deve-se atentar para o fato que os valores acima de  $10^{-3}$  não se enquadram na região ALARP.

No caso do limite superior do PLL, os resultados se encontram na região ALARP para todos os valores de  $p$  utilizados. O PLL assintótico ultrapassou a região ALARP nas idades  $T = 1.85, T = 1.6, T = 1.45$  e  $T = 1.3$  para  $p$  igual a 0.85, 0.9, 0.95 e 1, respectivamente. Desta

forma, à medida que o  $p$  aumentou, o PLL assintótico aumentou e a idade ótima de substituição diminuiu.

Figura 11 – PLL assintótico e do limite do PLL para diferentes valores de  $p$



Fonte: A Autora (2021)

Realizou-se um experimento numérico para averiguar os efeitos da variação dos parâmetros do modelo. Como pode ser observado na Tabela 3, cada parâmetro foi alterado em  $-50\%$ ,  $-25\%$ ,  $+25\%$  e  $50\%$  enquanto os outros foram conservados fixos.

Para os três valores de  $p$  estudados, quando o  $C'_m$  aumenta, a idade ótima de substituição ( $T^*$ ) não sofre variação e o  $B(T^*)$  aumenta.

Quando o custo de substituição ( $C'_r$ ) aumenta,  $T^*$  aumenta e  $B(T^*)$  aumenta.

Quando o custo de reparo perfeito ( $C'_p$ ) aumenta,  $T^*$  diminui e  $B(T^*)$  aumenta. Quanto melhor o grau do reparo, maior é o custo e, como é mais barato substituir antes da falha, a idade ótima de substituição é reduzida.

Quando o número esperado de mortes ( $PLL_A$ ) aumenta,  $T^*$  se mantém ou aumenta, enquanto o  $B(T^*)$  aumenta. O mesmo comportamento é observado para a probabilidade do acidente a devido a falha ( $p_A$ ) e o Valor de uma Fatalidade Evitada ( $v$ ) quando alterados separadamente. Esse comportamento ocorre devido ao aumento do risco, assim o custo aumenta e se torna mais seguro substituir o sistema em uma idade menor.

Quando o parâmetro de escala ( $\theta$ ) aumenta,  $T^*$  aumenta e  $B(T^*)$  diminui tanto para o caso do VPF fixo quanto para o VPF variável.

Finalmente, quando o parâmetro de forma ( $\beta$ ) aumenta,  $T^*$  diminui e  $B(T^*)$  diminui. Quando  $\beta$  diminui,  $T^*$  e  $B(T^*)$  aumentam. Com o aumento do padrão de desgaste, o sistema tende a ser reparado mais vezes e o reparo realizado tende a ser não perfeito por conta do seu

custo ser inferior ao do reparo perfeito, por isso, há diminuição do custo esperado de longo prazo.

Além disso, na Tabela 2, verifica-se que em alguns momentos quando  $p$  aumentou o PLL assintótico (aproximação do índice de risco) aumentou. Espera-se que com o aumento de  $p$  (probabilidade de reparo perfeito) a confiabilidade aumente e o risco diminua. Todavia, entende-se que ao se trabalhar com modelos probabilísticos tais variações podem ocorrer, visto que nem sempre o sistema será reparado perfeita ou minimamente.

Tabela 3 – Análise de sensibilidade para um ponto a priori (horizonte infinito)

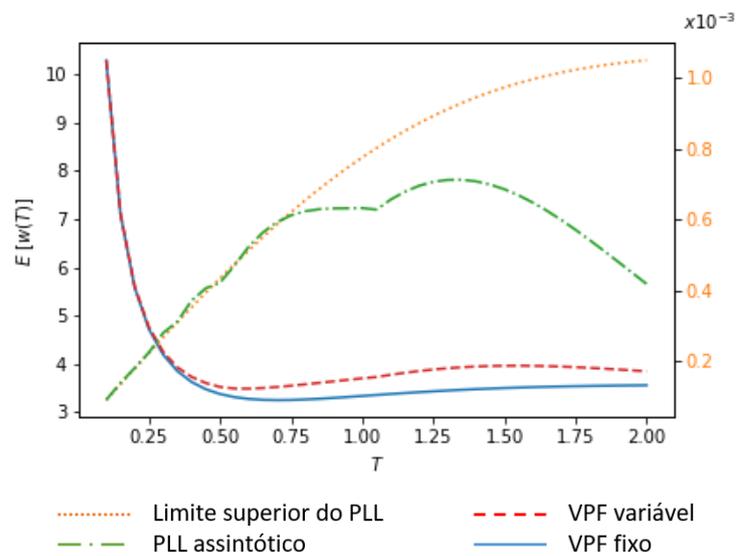
	Variação (%)	$p = 0,8$				$p = 0,9$				$p = 1$			
		VPF fixo		VPF variável		VPF fixo		VPF variável		VPF fixo		VPF variável	
		$T^*$	$B(T^*)$	$T^*$	$B(T^*)$	$T^*$	$B(T^*)$	$T^*$	$B(T^*)$	$T^*$	$B(T^*)$	$T^*$	$B(T^*)$
$C'_m$	-50	1.10	2.073	1.05	2.286	1.05	2.174	0.95	2.390	1.05	2.270	0.95	2.479
	-25	1.10	2.085	1.05	2.297	1.05	2.179	0.95	2.395	1.05	2.270	0.95	2.479
	+25	1.10	2.108	1.05	2.320	1.05	2.190	0.95	2.406	1.05	2.270	0.95	2.479
	+50	1.10	2.120	1.05	2.331	1.05	2.196	0.95	2.411	1.05	2.270	0.95	2.479
$C'_p$	-50	2.00	1.205	2.00	1.440	2.00	1.224	2.00	1.416	2.00	1.245	2.00	1.398
	-25	1.55	1.686	2.00	1.930	1.50	1.741	2.00	1.940	1.50	1.795	2.00	1.954
	+25	0.90	2.445	0.80	2.631	0.85	2.560	0.80	2.745	0.85	2.669	0.75	2.852
	+50	0.80	2.751	0.70	2.908	0.75	2.888	0.70	3.045	0.70	3.019	0.65	3.174
$C'_r$	-50	0.60	1.686	0.55	1.784	0.60	1.762	0.55	1.865	0.55	1.838	0.50	1.935
	-25	0.85	1.942	0.70	2.110	0.80	2.028	0.70	2.196	0.80	2.111	0.70	2.280
	+25	1.45	2.177	2.00	2.430	1.40	2.263	2.00	2.472	1.40	2.346	2.00	2.516
	+50	2.00	2.205	2.00	2.440	2.00	2.288	2.00	2.480	1.95	2.368	2.00	2.521
$PLL_A$	-50	1.15	2.049	1.05	2.104	1.10	2.139	1.05	2.195	1.05	2.226	1.00	2.280
	-25	1.10	2.073	1.05	2.193	1.10	2.162	1.00	2.286	1.05	2.248	1.00	2.368
	+25	1.10	2.120	1.05	2.450	1.05	2.207	0.85	2.534	1.00	2.291	0.90	2.613
	+50	1.05	2.143	0.75	2.592	1.05	2.229	0.75	2.681	1.00	2.312	0.80	2.763
$p_A$	-50	1.15	2.049	1.05	2.104	1.10	2.139	1.05	2.195	1.05	2.226	1.00	2.280
	-25	1.10	2.073	1.05	2.193	1.10	2.162	1.00	2.286	1.05	2.248	1.00	2.368
	+25	1.10	2.120	1.05	2.450	1.05	2.207	0.85	2.534	1.00	2.291	0.90	2.613
	+50	1.05	2.143	0.75	2.592	1.05	2.229	0.75	2.681	1.00	2.312	0.80	2.763
$v$	-50	1.15	2.049	1.05	2.158	1.10	2.139	1.05	2.251	1.05	2.226	1.00	2.334
	-25	1.10	2.073	1.05	2.233	1.10	2.162	1.00	2.328	1.05	2.248	0.95	2.407
	+25	1.10	2.120	1.05	2.383	1.05	2.207	0.90	2.472	1.00	2.291	0.90	2.549
	+50	1.05	2.143	0.85	2.458	1.05	2.229	0.85	2.541	1.00	2.312	0.85	2.619
$\theta$	-50	0.55	4.193	0.35	4.986	0.55	4.370	0.30	5.310	0.50	4.540	0.25	5.730
	-25	0.85	2.796	2.00	3.149	0.80	2.913	2.00	3.195	0.75	3.027	2.00	3.255
	+25	1.40	1.677	1.10	1.817	1.35	1.748	1.05	1.888	1.30	1.816	1.05	1.956
	+50	1.65	1.398	1.35	1.509	1.60	1.456	1.35	1.568	1.55	1.513	1.30	1.624
$\beta$	-25	2.00	2.080	2.00	2.251	2.00	2.201	2.00	2.351	2.00	2.320	2.00	2.449
	+25	0.90	2.016	0.75	2.179	0.85	2.083	0.75	2.242	0.85	2.146	0.75	2.303
	+50	0.80	1.925	0.75	2.040	0.80	1.976	0.70	2.090	0.80	2.027	0.70	2.137

Fonte: A Autora (2021)

### 8.1.2 Caso de um ciclo de substituição

Ao trabalhar com o caso de um ciclo de substituição utilizou-se as Equações (4.21) e (4.22) para obtenção do custo esperado de  $W(T)$ . A Figura 12 apresenta o custo esperado de  $W(T)$  para o VPF fixo (linha azul) e o VPF crescente (linha vermelha) para  $p = 0.9$ . Ao se considerar o VPF fixo, a idade ótima de substituição é  $T^* = 0.7$  e o custo ótimo igual a 3.244. Ao se empregar o VPF crescente, a idade ideal de substituição é  $T^* = 0.6$  e o custo ótimo é igual a 3.482.

Figura 12 – Custo de um ciclo de substituição para  $\beta = 2$



Fonte: A Autora (2021)

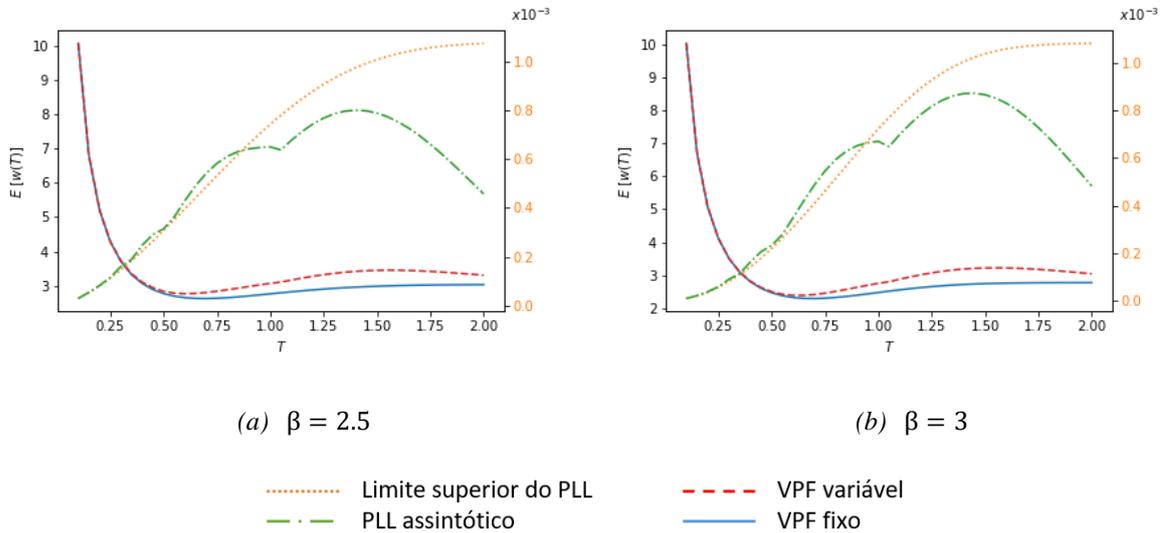
Para os valores utilizados, durante todo o intervalo analisado o limite superior do PLL está incluso nos níveis de aceitação ( $10^{-5}$  e  $10^{-3}$ ), ao passo que ao se considerar o PLL assintótico, os critérios de aceitação restringem o conjunto de tempos ótimos de substituição para o intervalo  $[0, 1.6]$ . Assim, tanto em  $T^* = 0.7$  quanto em  $T^* = 0.6$  os valores de risco se encontram dentro do nível aceitável e são permitidos.

Semelhante ao caso do horizonte infinito, o custo ótimo se mostrou maior e a idade ótima diminuiu quando o VPF foi considerado crescente, isso se dá por conta do aumento do índice de risco ao longo do tempo.

Quando se trabalha com o caso de um ciclo de substituição, tanto no caso do VPF fixo quanto do VPF crescente o custo ótimo aumenta e a idade de substituição diminui quando compara-se com o horizonte de tempo infinito. Com o aumento do risco torna-se mais apropriado substituir o equipamento em uma idade menor para preservação das vidas, por isso há aumento no custo.

A Figura 13 apresenta o comportamento das curvas quando o parâmetro de forma é alterado para 2.5 e 3. É possível perceber o aumento do índice de risco decorrente do aumento de  $\beta$ .

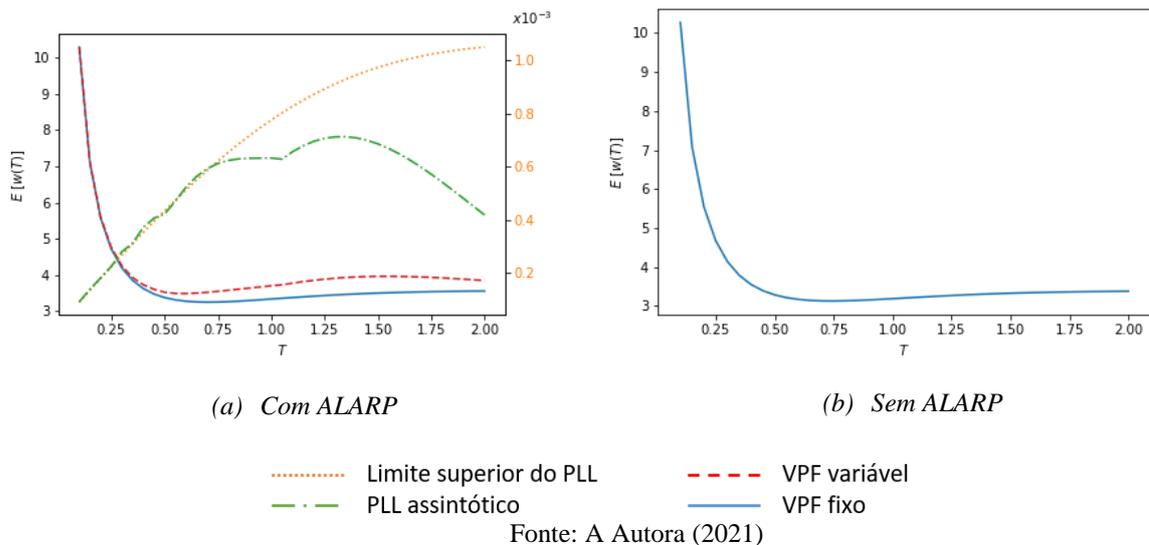
Figura 13 – Custo de um ciclo de substituição para  $\beta = 2.5$  e  $\beta = 3$



Fonte: A Autora (2021)

Na Figura 14 é realizada uma comparação entre as curvas obtidas na Figura 15 e a curva de custo na qual os princípios de risco envolvendo o ALARP não foram introduzidos. Quando o ALARP não é considerado no modelo, o custo ótimo diminui para 3.126 e a idade de substituição aumenta para 0.75.

Figura 14 – Custo de um ciclo de substituição com e sem ALARP



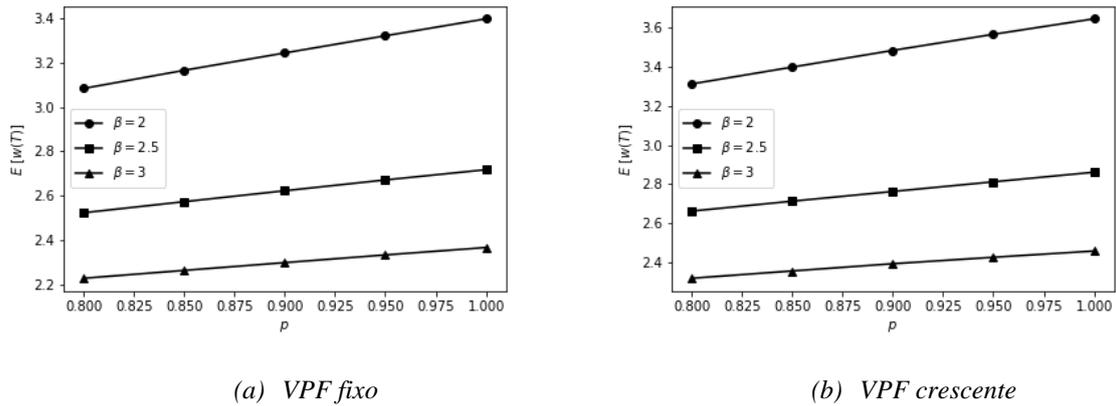
Fonte: A Autora (2021)

A Figura 15 mostra o custo ótimo de longo prazo para diferentes valores de  $p$  quando  $\beta = 2$ ,  $\beta = 2.5$  e  $\beta = 3$ . Na Tabela 4 é possível observar alguns valores de  $E[W(T)]$  para  $p = 0.8$ ,  $p = 0.9$  e  $p = 1$ . Nota-se que tanto para o VPF fixo quanto para o VPF crescente o custo

ótimo aumenta quando  $p$  aumenta porque quando o reparo tende a ser perfeito é mais econômico substituir o sistema antes da falha devido ao alto custo do reparo perfeito.

Quando o padrão de desgaste aumenta o custo ótimo diminui, isso ocorre por conta da maior probabilidade de falhas e tendência a realização de mais reparos não perfeitos, por estes serem mais baratos. Esse comportamento é similar ao do horizonte de planejamento infinito.

Figura 15 – Custo ótimo de um ciclo de substituição para diferentes valores de  $p$

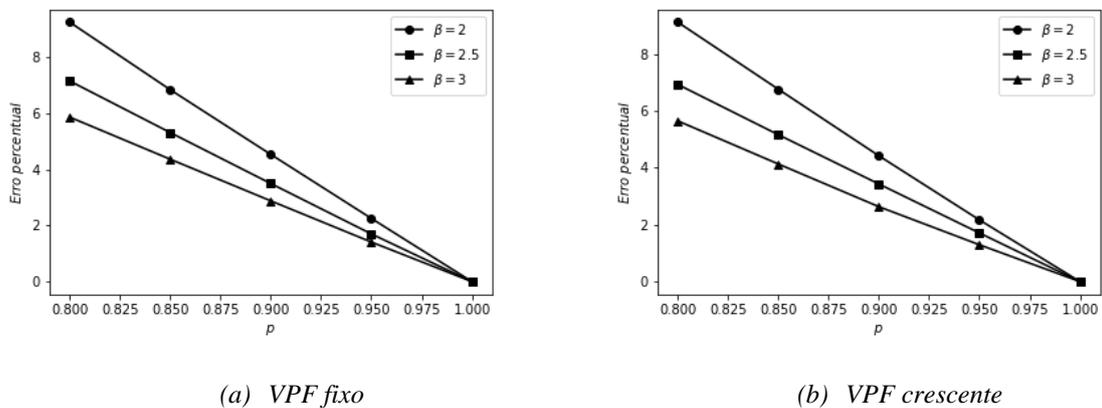


Fonte: A Autora (2021)

Na Figura 16, o erro percentual do custo ótimo diminui à medida que o reparo tende a ser perfeito. Ao considerar  $p = 0.80$  e  $\beta = 2$ , o erro relativo é de 3.084% e 3.311% quando o VPF é fixo e crescente, respectivamente. Assim, o erro relativo se mostra menor quando comparado com o horizonte de planejamento infinito.

Por sua vez, quando  $p = 0.90$  e  $\beta = 2$ , o erro relativo é de 3.244% e 3.482% quando o VPF é fixo e crescente, respectivamente. Para os outros valores de  $p$  e  $\beta$  o erro percentual também se mostra menor considerando o VPF crescente.

Figura 16 – Erro percentual do custo ótimo (um ciclo de substituição)



Fonte: A Autora (2021)

O PLL assintótico e o limite superior do PLL apresentam comportamento igual ao da Figura 11, visto que utiliza-se a mesma função distribuição acumulada,  $F(T)$ .

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos por meio da variação de cada parâmetro do modelo em  $-50\%$ ,  $-25\%$ ,  $+25\%$  e  $50\%$ .

Os comportamentos são similares com os apresentados na Tabela 3, mas para o caso de um ciclo de substituição os valores de  $T^*$  foram menores, ao passo que os valores de  $B(T^*)$  foram maiores.

Tabela 4 – Custo de um ciclo de substituição para um ponto a priori (continua)

$\beta$	$T$	$p = 0.8$		$p = 0.9$		$p = 1$	
		$E[W(T)]$ VPF Fixo	$E[W(T)]$ VPF Variável	$E[W(T)]$ VPF Fixo	$E[W(T)]$ VPF Variável	$E[W(T)]$ VPF Fixo	$E[W(T)]$ VPF Variável
2	0.50	3,2447	3,3762	3,3706	3,5174	3,4950	3,6562
	0.55	3,1721	3,3251	3,3073	3,4847	3,4404	<b>3,6429</b>
	0.60	3,1260	<b>3,3111</b>	3,2695	<b>3,4820</b>	3,4104	3,6506
	0.65	3,0991	3,3146	3,2501	3,4944	<b>3,3980</b>	3,6708
	0.70	3,0863	3,3297	<b>3,2440</b>	3,5161	3,3981	3,6975
	0.75	<b>3,0838</b>	3,3522	3,2474	3,5430	3,4067	3,7272
	0.80	3,0888	3,3793	3,2575	3,5725	3,4213	3,7578
	0.85	3,0992	3,4088	3,2722	3,6031	3,4398	3,7883
	0.90	3,1133	3,4396	3,2900	3,6339	3,4605	3,8187
	0.95	3,1300	3,4708	3,3095	3,6648	3,4824	3,8491
	1.00	3,1481	3,5021	3,3299	3,6957	3,5045	3,8800
	1.05	3,1670	3,5048	3,3506	3,7229	3,5263	3,9312
	1.10	3,1861	3,5498	3,3709	3,7689	3,5473	3,9772
	1.15	3,2050	3,5919	3,3905	3,8105	3,5672	4,0173
	1.20	3,2233	3,6305	3,4091	3,8472	3,5858	4,0511
1.25	3,2408	3,6650	3,4266	3,8787	3,6029	4,0786	
1.30	3,2574	3,6953	3,4428	3,9048	3,6185	4,0997	
1.35	3,2729	3,7211	3,4576	3,9255	3,6325	4,1145	
1.40	3,2872	3,7425	3,4712	3,9409	3,6452	4,1234	
1.45	3,3004	3,7594	3,4834	3,9513	3,6564	4,1268	
1.50	3,3124	3,7719	3,4944	3,9569	3,6663	4,1252	
2.5	0.50	2,6994	2,7596	2,7679	2,8335	2,8356	2,9057
	0.55	2,6155	2,6904	2,6924	2,7789	2,7682	2,8666
	0.60	2,5629	2,6637	2,6478	<b>2,7631</b>	2,7313	<b>2,8611</b>
	0.65	2,5339	<b>2,6631</b>	2,6263	2,7721	<b>2,7169</b>	2,8790
	0.70	<b>2,5226</b>	2,6815	<b>2,6219</b>	2,7984	2,7189	2,9119
	0.75	2,5245	2,7133	2,6301	2,8359	2,7328	2,9534
	0.80	2,5363	2,7539	2,6474	2,8798	2,7550	2,9988
	0.85	2,5553	2,7996	2,6710	2,9265	2,7826	3,0450
	0.90	2,5792	2,8478	2,6987	2,9737	2,8134	3,0905
	0.95	2,6062	2,8964	2,7287	3,0203	2,8458	3,1350
	1.00	2,6351	2,9444	2,7597	3,0656	2,8783	3,1788
	1.05	2,6646	2,9521	2,7905	3,1022	2,9099	3,2435
	1.10	2,6938	3,0132	2,8203	3,1636	2,9398	3,3043
	1.15	2,7220	3,0718	2,8485	3,2211	2,9676	3,3597
	1.20	2,7488	3,1267	2,8747	3,2733	2,9928	3,4084
1.25	2,7737	3,1769	2,8986	3,3194	3,0154	3,4498	
1.30	2,7966	3,2216	2,9201	3,3588	3,0353	3,4832	
1.35	2,8173	3,2604	2,9391	3,3910	3,0525	3,5085	
1.40	2,8357	3,2928	2,9556	3,4160	3,0672	3,5258	
1.45	2,8520	3,3188	2,9699	3,4339	3,0796	3,5355	
1.50	2,8661	3,3384	2,9820	3,4448	3,0898	3,5380	

Tabela 4 – Custo de um ciclo de substituição para um ponto a priori (conclusão)

$\beta$	$T$	$p = 0.8$		$p = 0.9$		$p = 1$	
		$E[W(T)]$ VPF Fixo	$E[W(T)]$ VPF Variável	$E[W(T)]$ VPF Fixo	$E[W(T)]$ VPF Variável	$E[W(T)]$ VPF Fixo	$E[W(T)]$ VPF Variável
3	0.50	2,4321	2,4611	2,4735	2,5046	2,5146	2,5471
	0.55	2,3350	2,3738	2,3839	2,4285	2,4321	2,4829
	0.60	2,2735	2,3312	2,3297	2,3957	2,3852	<b>2,4595</b>
	0.65	2,2394	<b>2,3207</b>	2,3030	<b>2,3948</b>	<b>2,3654</b>	2,4676
	0.70	<b>2,2267</b>	2,3358	<b>2,2974</b>	2,4186	2,3664	2,4988
	0.75	2,2308	2,3707	2,3079	2,4603	2,3830	2,5458
	0.80	2,2475	2,4201	2,3305	2,5139	2,4109	2,6018
	0.85	2,2737	2,4791	2,3617	2,5742	2,4465	2,6615
	0.90	2,3065	2,5434	2,3986	2,6370	2,4868	2,7212
	0.95	2,3437	2,6095	2,4388	2,6992	2,5294	2,7794
	1.00	2,3831	2,6748	2,4803	2,7594	2,5722	2,8361
	1.05	2,4231	2,6885	2,5213	2,8055	2,6136	2,9144
	1.10	2,4624	2,7650	2,5605	2,8813	2,6523	2,9886
	1.15	2,4998	2,8387	2,5970	2,9525	2,6874	3,0565
	1.20	2,5345	2,9077	2,6301	3,0173	2,7185	3,1164
	1.25	2,5659	2,9705	2,6593	3,0742	2,7454	3,1671
	1.30	2,5938	3,0259	2,6845	3,1224	2,7680	3,2079
1.35	2,6180	3,0731	2,7058	3,1613	2,7866	3,2386	
1.40	2,6386	3,1117	2,7234	3,1908	2,8015	3,2594	
1.45	2,6558	3,1417	2,7377	3,2113	2,8132	3,2708	
1.50	2,6698	3,1632	2,7489	3,2230	2,8221	3,2736	

Fonte: A Autora (2021)

Tabela 5 – Análise de sensibilidade para um ponto a priori (um ciclo de substituição)

Variação (%)	$p = 0,8$				$p = 0,9$				$p = 1$				
	VPF fixo		VPF variável		VPF fixo		VPF variável		VPF fixo		VPF variável		
	$T^*$	$E[W(T^*)]$	$T^*$	$E[W(T^*)]$	$T^*$	$E[W(T^*)]$	$T^*$	$E[W(T^*)]$	$T^*$	$E[W(T^*)]$	$T^*$	$E[W(T^*)]$	
$C'_m$	-50	0.75	3.0675	0.60	3.2974	0.70	3.2364	0.60	3.4752	0.65	3.3980	0.55	3.6429
	-25	0.75	3.0756	0.60	3.3042	0.70	3.2402	0.60	3.4786	0.65	3.3980	0.55	3.6429
	+25	0.75	3.0919	0.60	3.3179	0.70	3.2478	0.60	3.4854	0.65	3.3980	0.55	3.6429
	+50	0.75	3.1000	0.60	3.3248	0.70	3.2516	0.60	3.4888	0.65	3.3980	0.55	3.6429
$C'_p$	-50	2.00	1.8129	2.00	2.1524	2.00	1.8823	2.00	2.1724	2.00	1.9497	2.00	2.1918
	-25	1.00	2.5187	0.75	2.8313	0.95	2.6390	0.75	2.9665	0.90	2.7543	2.00	3.0739
	+25	0.60	3.5636	0.55	3.7321	0.60	3.7564	0.50	3.9358	0.55	3.9396	0.50	4.1174
	+50	0.55	3.9860	0.50	4.1259	0.50	4.2075	0.50	4.3542	0.50	4.4175	0.45	4.5720
$C'_r$	-50	0.45	2.4090	0.40	2.5062	0.40	2.5382	0.40	2.6438	0.40	2.6597	0.35	2.7666
	-25	0.60	2.8136	0.50	2.9668	0.55	2.9611	0.50	3.1181	0.55	3.1045	0.50	3.2668
	+25	0.95	3.2578	0.75	3.5648	0.90	3.4240	0.75	3.7439	0.85	3.5826	0.70	3.9163
	+50	1.20	3.3550	1.05	3.7019	1.15	3.5227	2.00	3.8485	1.10	3.6829	2.00	3.9605
$PLL_A$	-50	0.75	3.0252	0.70	3.0903	0.70	3.1861	0.70	3.2530	0.70	3.3380	0.65	3.4082
	-25	0.75	3.0545	0.65	3.1932	0.70	3.2150	0.65	3.3593	0.70	3.3680	0.60	3.5180
	+25	0.75	3.1131	0.55	3.4352	0.70	3.2729	0.55	3.6096	0.65	3.4265	0.50	3.7711
	+50	0.70	3.1419	0.55	3.5649	0.70	3.3019	0.50	3.7476	0.65	3.4549	0.50	3.9066
$p_A$	-50	0.75	3.0252	0.70	3.0903	0.70	3.1861	0.70	3.2530	0.70	3.3380	0.65	3.4082
	-25	0.75	3.0545	0.65	3.1932	0.70	3.2150	0.65	3.3593	0.70	3.3680	0.60	3.5180
	+25	0.75	3.1131	0.55	3.4352	0.70	3.2729	0.55	3.6096	0.65	3.4265	0.50	3.7711
	+50	0.70	3.1419	0.55	3.5649	0.70	3.3019	0.50	3.7476	0.65	3.4549	0.50	3.9066
$v$	-50	0.75	3.0252	0.70	3.1523	0.70	3.1861	0.65	3.3175	0.70	3.3380	0.60	3.4770
	-25	0.75	3.0545	0.65	3.2344	0.70	3.2150	0.60	3.4032	0.70	3.3680	0.60	3.5638
	+25	0.75	3.1131	0.60	3.3820	0.70	3.2729	0.55	3.5530	0.65	3.4265	0.55	3.7185
	+50	0.70	3.1419	0.55	3.4474	0.70	3.3019	0.55	3.6213	0.65	3.4549	0.50	3.7829
$\theta$	-50	0.35	6.1725	0.35	7.0328	0.35	6.4880	0.30	7.3493	0.35	6.7961	0.25	7.6421
	-25	0.55	4.1115	0.45	4.4919	0.55	4.3272	0.45	4.7240	0.50	4.5292	0.45	4.9516
	+25	0.90	2.4674	0.80	2.6206	0.90	2.5955	0.80	2.7548	0.85	2.7175	0.75	2.8829
	+50	1.10	2.0558	1.05	2.1515	1.05	2.1627	1.00	2.2689	1.00	2.2646	0.95	2.3718
$\beta$	-25	0.80	4.7158	0.65	5.1797	0.75	5.0676	0.60	5.5811	0.70	5.4079	2.00	5.9235
	+25	0.70	2.5226	0.65	2.6631	0.70	2.6219	0.60	2.7631	0.65	2.7169	0.60	2.8611
	+50	0.70	2.2267	0.65	2.3207	0.70	2.2974	0.65	2.3948	0.65	2.3654	0.60	2.4595

Fonte: A Autora (2021)

### 8.1.3 Síntese dos resultados para um ponto a priori

A Tabela 6 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos para um ponto a priori. É possível perceber mais uma vez que os valores da idade ótima são maiores quando o horizonte de tempo é infinito e os custos são menores. Tanto no caso do horizonte infinito quanto de um ciclo de substituição, a inserção dos critérios de aceitação do ALARP diminuiu o valor da idade ótima e aumentou os custos. Essas perspectivas são úteis para os gestores de manutenção

ajustarem as programações de manutenção, a escolha do caso a ser adotado dependerá do horizonte de planejamento de interesse e o grau de aceitação do risco.

Tabela 6 – Síntese dos resultados para um ponto *a priori*

		<b><math>p = 0.8</math></b>		<b><math>p = 0.9</math></b>		<b><math>p = 1</math></b>	
		<b><math>T^*</math></b>	<b><math>B(T^*)</math></b>	<b><math>T^*</math></b>	<b><math>B(T^*)</math></b>	<b><math>T^*</math></b>	<b><math>B(T^*)</math></b>
Horizonte Infinito	Sem ALARP	1.20	2.001	1.15	2.093	1.10	2.182
	VPF fixo	1.10	2.097	1.05	2.185	1.05	2.270
	VPF variável	1.05	2.308	0.95	2.400	0.95	2.479
Um ciclo de substituição	Sem ALARP	0.80	2.966	0.75	3.126	0.70	3.278
	VPF fixo	0.75	3.084	0.70	3.244	0.65	3.398
	VPF variável	0.70	3.244	0.60	3.482	0.55	3.643

Fonte: A Autora (2021)

## 8.2 DOIS PONTOS A PRIORI

O uso de mais de um ponto *a priori* pode ser empregado para a situação que a organização possui  $k = 2$  equipes de reparo, seus integrantes possuem diferentes habilidades de reparo e são solicitados de forma aleatória para reparar um sistema com falha. Com isso, a probabilidade de reparo perfeito varia aleatoriamente em virtude das habilidades dos colaboradores.

Ao se admitir dois pontos *a priori*,  $P$  é considerada uma variável aleatória com a seguinte distribuição.

$$P = \begin{cases} p_1 & \text{com probabilidade } \pi_1 \\ p_2 & \text{com probabilidade } \pi_2 \end{cases} \quad (5.6)$$

De maneira que  $\pi_1 + \pi_2 = 1$ ,  $0 \leq p_1 < p_2 \leq 1$ . Assim, tem-se as seguintes equações para o contexto de dois pontos *a priori*.

$$\overline{H}(t) = \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (5.7)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\theta} t^{\beta-1} \left( p_1 \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_2 \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \right) \quad (5.8)$$

$$r_H(t) = \frac{\beta}{\theta} t^{\beta-1} \left( \frac{p_1 \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_2 \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}}{\pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}} \right) \quad (5.9)$$

$$r_G(t) = \frac{\beta}{\theta} t^{\beta-1} \left( \frac{(1-p_1) \pi_1 e^{-(1-p_1) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + (1-p_2) \pi_2 e^{-(1-p_2) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}}{\pi_1 e^{-(1-p_1) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-(1-p_2) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}} \right) \quad (5.10)$$

$$R(T) = \left\{ \left[ 1 - \left( \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{T}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{T}{\theta}\right)^\beta} \right) \right] \left( 1 + \left\lfloor \frac{u}{T} \right\rfloor \right) - 1 - \left( \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{T - \left\lfloor \frac{u}{T} \right\rfloor T}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{T - \left\lfloor \frac{u}{T} \right\rfloor T}{\theta}\right)^\beta} \right) \right\} P_A^{PLL_A} \quad (5.11)$$

Para ilustrar a aplicação do modelo, continuarão sendo utilizados os valores iniciais da seção 5.1 e  $p_1$  será igual a 0.8.

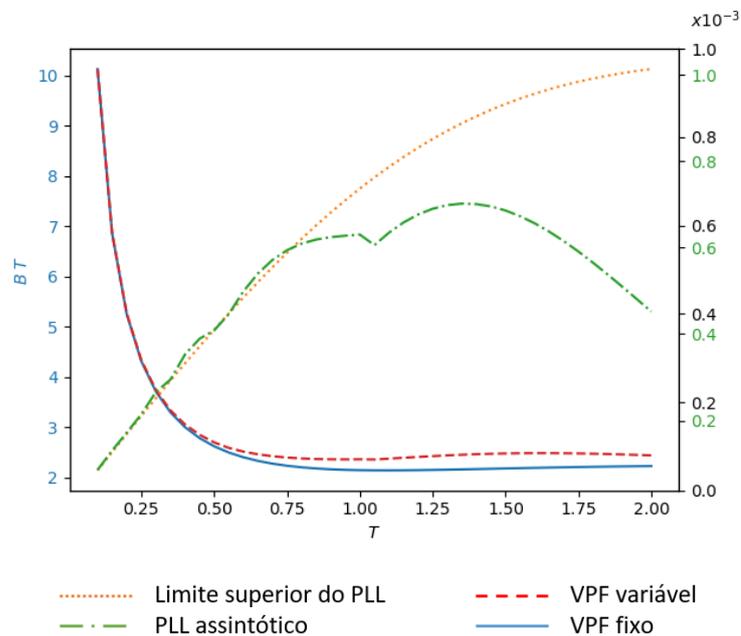
$C'_r$	$C'_p$	$C'_m$	$v$	$P_A$	$PLL_A$	$\beta$	$\theta$	$p_1$	$r_0$	$r_1$	$u$
1	2	0.25	100	0.1	0.01	2	1	0.8	$10^{-5}$	$10^{-3}$	1

### 8.2.1 Caso do horizonte infinito

Para dois pontos *a priori* e o horizonte de planejamento infinito, o custo esperado de longo prazo é obtido por meio das Equações (4.16) e (4.17) e a aplicação das Equações (5.6) a (5.11).

Na Figura 17 tem-se o custo esperado de longo prazo para o VPF fixo (linha azul) e o VPF crescente (linha vermelha) para o caso em que  $p_1 = 0.8$ ,  $p_2 = 0.9$ ,  $\pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$ . Quando o VPF é fixo a idade ideal de substituição é  $T^* = 1,1$ , sendo o menor custo de longo prazo igual a 2.139. Ao passo que, ao se empregar o VPF crescente a idade ideal de substituição é  $T^* = 1.05$  e o menor custo de longo prazo é igual a 2.355.

Figura 17 – Custo esperado de longo prazo para dois pontos a priori para  $\beta = 2$



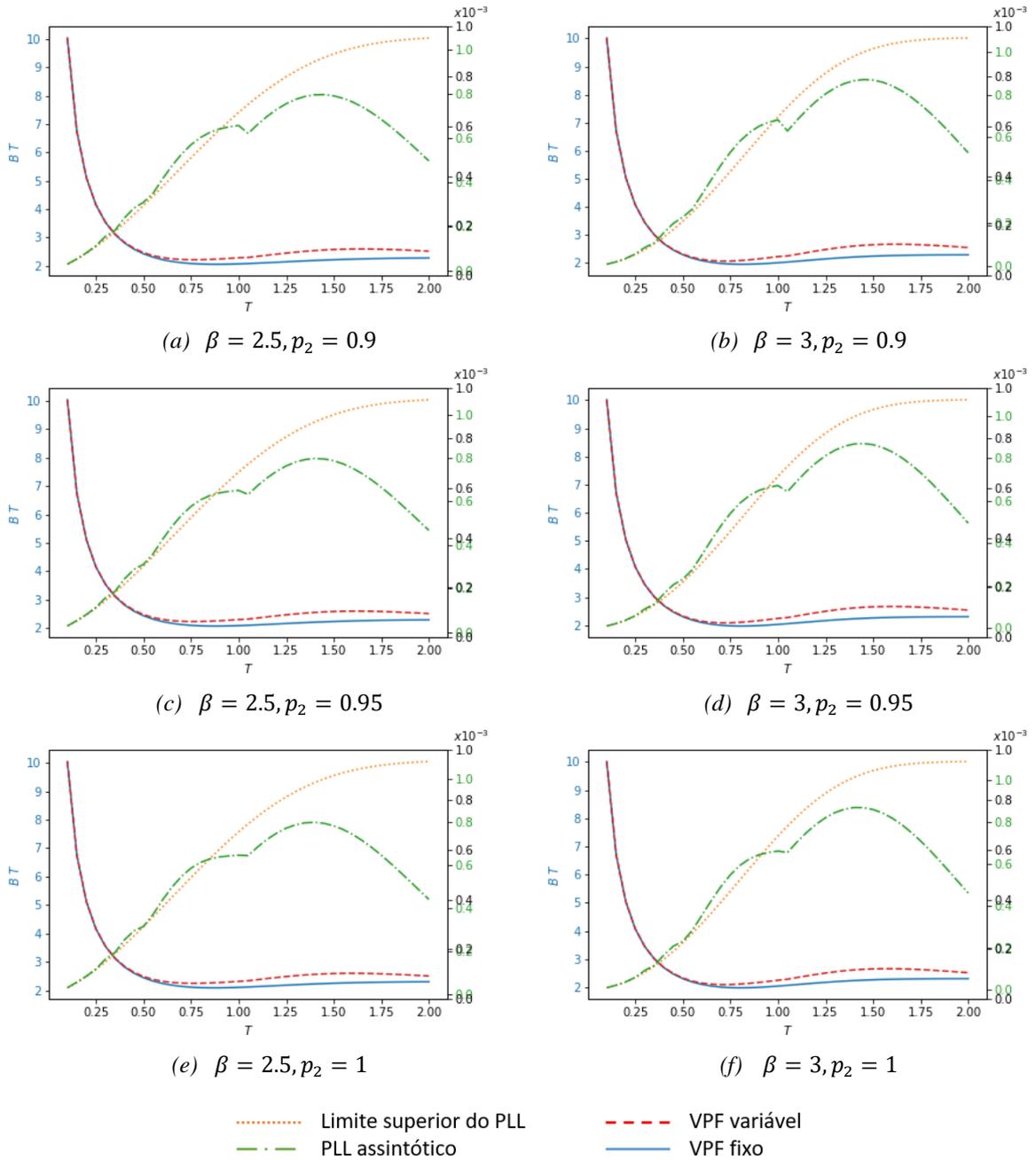
Fonte: A Autora (2021)

Assim, ao se trabalhar com dois pontos *a priori* e reduzir um dos valores de  $p$ , percebe-se que o custo diminuiu e a idade de substituição aumentou para o VPF fixo e o VPF variável, situação similar à que foi retratada para um ponto *a priori*.

O limite do PLL superior está incluso nos níveis de aceitação ( $10^{-5}$  e  $10^{-3}$ ) durante todo o intervalo apresentado, para idades acima de 1.5 o PLL assintótico não se enquadra na região ALARP.

A Figura 18 mostra o comportamento das 4 curvas para alguns valores de  $p_2$  e  $\beta$  quando  $\pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$ . As curvas são ligeiramente alteradas quando  $p$  varia e sofrem uma ampla mudança quando  $\beta$  aumenta.

Figura 18 – Custo esperado de longo prazo para dois pontos a priori e diferentes valores de  $p_2$  e  $\beta$



Fonte: A Autora (2021)

Tabela 7 – Resultados para dois pontos a priori quando  $p_1 = 0.8$ ,  $\pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$  (continua)

$\beta$	$T$	$p_2 = 0.9$				$p_2 = 0.95$				$p_2 = 1$			
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL
	<b>0.50</b>	2.6188	2.6965	0.4100	0.4085	2.6313	2.7099	0.4215	0.4141	2.6436	2.7231	0.4328	0.4192
	<b>0.55</b>	2.4951	2.5879	0.4476	0.4461	2.5086	2.6035	0.4600	0.4570	2.5219	2.6188	0.4722	0.4678
	<b>0.60</b>	2.4007	2.5131	0.4843	0.4984	2.4151	2.5298	0.4975	0.5095	2.4293	2.5461	0.5106	0.5203
	<b>0.65</b>	2.3284	2.4593	0.5200	0.5400	2.3437	2.4768	0.5340	0.5504	2.3587	2.4938	0.5478	0.5604
	<b>0.70</b>	2.2732	2.4211	0.5546	0.5715	2.2893	2.4391	0.5693	0.5806	2.3050	2.4565	0.5838	0.5891
	<b>0.75</b>	2.2313	2.3945	0.5881	0.5940	2.2482	2.4128	0.6034	0.6014	2.2646	2.4303	0.6185	0.6081
	<b>0.80</b>	2.2000	2.3766	0.6203	0.6092	2.2175	2.3950	0.6363	0.6147	2.2346	2.4124	0.6519	0.6194
	<b>0.85</b>	2.1771	2.3655	0.6514	0.6187	2.1952	2.3837	0.6678	0.6223	2.2127	2.4011	0.6839	0.6252
	<b>0.90</b>	2.1609	2.3596	0.6811	0.6242	2.1795	2.3777	0.6980	0.6262	2.1974	2.3949	0.7145	0.6277
	<b>0.95</b>	2.1500	2.3581	0.7096	0.6275	2.1690	<b>2.3761</b>	0.7268	0.6284	2.1873	<b>2.3932</b>	0.7436	0.6288
<b>2</b>	<b>1.00</b>	2.1433	2.3603	0.7367	0.6302	2.1627	2.3783	0.7542	0.6304	2.1813	2.3953	0.7712	0.6304
	<b>1.05</b>	2.1400	<b>2.3557</b>	0.7624	0.6058	2.1597	2.3774	0.7802	0.6157	2.1785	2.3977	0.7974	0.6250
	<b>1.10</b>	<b>2.1394</b>	2.3727	0.7867	0.6346	<b>2.1593</b>	2.3943	0.8047	0.6440	<b>2.1783</b>	2.4144	0.8220	0.6528
	<b>1.15</b>	2.1409	2.3901	0.8096	0.6582	2.1609	2.4114	0.8277	0.6669	2.1800	2.4310	0.8451	0.6749
	<b>1.20</b>	2.1439	2.4070	0.8312	0.6766	2.1641	2.4278	0.8493	0.6843	2.1831	2.4468	0.8667	0.6913
	<b>1.25</b>	2.1482	2.4230	0.8514	0.6899	2.1684	2.4431	0.8695	0.6964	2.1874	2.4614	0.8868	0.7020
	<b>1.30</b>	2.1533	2.4376	0.8702	0.6983	2.1735	2.4569	0.8882	0.7033	2.1924	2.4742	0.9054	0.7074
	<b>1.35</b>	2.1590	2.4504	0.8876	0.7018	2.1791	2.4688	0.9056	0.7051	2.1978	2.4850	0.9226	0.7075
	<b>1.40</b>	2.1650	2.4612	0.9037	0.7006	2.1850	2.4786	0.9216	0.7022	2.2036	2.4936	0.9385	0.7027
	<b>1.45</b>	2.1712	2.4699	0.9186	0.6952	2.1911	2.4861	0.9363	0.6949	2.2095	2.4999	0.9530	0.6935
	<b>1.50</b>	2.1774	2.4764	0.9322	0.6858	2.1971	2.4914	0.9497	0.6835	2.2153	2.5040	0.9662	0.6801

Tabela 7 – Resultados para dois pontos a priori quando  $p_1 = 0.8$ ,  $\pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$  (continuação)

$\beta$	$T$	$p_2 = 0.9$				$p_2 = 0.95$				$p_2 = 1$		
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico
<b>0.50</b>	2.4237	2.4647	0.2909	0.3068	2.4322	2.4735	0.2991	0.3096	2.4406	2.4822	0.3072	0.3117
<b>0.55</b>	2.3036	2.3565	0.3327	0.3450	2.3131	2.3674	0.3420	0.3539	2.3226	2.3781	0.3511	0.3628
<b>0.60</b>	2.2153	2.2866	0.3753	0.4100	2.2259	2.2988	0.3856	0.4198	2.2364	2.3108	0.3958	0.4293
<b>0.65</b>	2.1514	2.2429	0.4185	0.4701	2.1631	2.2562	0.4298	0.4799	2.1745	2.2693	0.4409	0.4892
<b>0.70</b>	2.1066	2.2191	0.4618	0.5226	2.1192	2.2332	0.4740	0.5315	2.1316	2.2470	0.4861	0.5397
<b>0.75</b>	2.0767	<b>2.2102</b>	0.5050	0.5661	2.0903	<b>2.2248</b>	0.5181	0.5731	2.1035	<b>2.2389</b>	0.5310	0.5792
<b>0.80</b>	2.0587	2.2122	0.5477	0.5998	2.0731	2.2270	0.5616	0.6044	2.0870	2.2411	0.5753	0.6078
<b>0.85</b>	2.0501	2.2222	0.5897	0.6243	2.0652	2.2368	0.6044	0.6260	2.0797	2.2506	0.6187	0.6266
<b>0.90</b>	<b>2.0488</b>	2.2378	0.6308	0.6408	<b>2.0645</b>	2.2520	0.6460	0.6398	<b>2.0796</b>	2.2653	0.6609	0.6379
<b>0.95</b>	2.0533	2.2575	0.6705	0.6513	2.0694	2.2712	0.6863	0.6481	2.0849	2.2840	0.7015	0.6443
<b>2,5 1.00</b>	2.0620	2.2801	0.7087	0.6580	2.0785	2.2935	0.7249	0.6535	2.0943	2.3058	0.7405	0.6488
<b>1.05</b>	2.0740	2.2885	0.7452	0.6162	2.0907	2.3069	0.7616	0.6261	2.1066	2.3240	0.7774	0.6355
<b>1.10</b>	2.0882	2.3278	0.7797	0.6572	2.1051	2.3460	0.7963	0.6668	2.1210	2.3627	0.8122	0.6758
<b>1.15</b>	2.1038	2.3675	0.8121	0.6939	2.1207	2.3852	0.8288	0.7029	2.1366	2.4012	0.8447	0.7113
<b>1.20</b>	2.1202	2.4064	0.8423	0.7256	2.1370	2.4233	0.8589	0.7338	2.1526	2.4382	0.8747	0.7412
<b>1.25</b>	2.1368	2.4433	0.8702	0.7519	2.1534	2.4590	0.8867	0.7589	2.1688	2.4728	0.9023	0.7650
<b>1.30</b>	2.1532	2.4772	0.8957	0.7722	2.1695	2.4916	0.9120	0.7777	2.1844	2.5039	0.9273	0.7822
<b>1.35</b>	2.1689	2.5075	0.9188	0.7864	2.1849	2.5203	0.9348	0.7900	2.1994	2.5309	0.9498	0.7927
<b>1.40</b>	2.1837	2.5334	0.9396	0.7942	2.1993	2.5446	0.9552	0.7958	2.2134	2.5533	0.9699	0.7964
<b>1.45</b>	2.1975	2.5548	0.9580	0.7958	2.2126	2.5641	0.9733	0.7952	2.2262	2.5709	0.9875	0.7934
<b>1.50</b>	2.2101	2.5713	0.9743	0.7914	2.2247	2.5786	0.9891	0.7882	2.2377	2.5835	1.0030	0.7839

Tabela 7 – Resultados para dois pontos a priori quando  $p_1 = 0.8$ ,  $\pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$  (conclusão)

$\beta$	$T$	$p_2 = 0.9$				$p_2 = 0.95$				$p_2 = 1$		
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico
<b>0.50</b>	2.2933	2.3147	0.2069	0.2278	2.2991	2.3206	0.2128	0.2289	2.3049	2.3264	0.2186	0.2292
<b>0.55</b>	2.1704	2.2002	0.2481	0.2631	2.1773	2.2079	0.2551	0.2701	2.1842	2.2156	0.2620	0.2771
<b>0.60</b>	2.0821	2.1266	0.2922	0.3304	2.0901	2.1357	0.3003	0.3387	2.0980	2.1446	0.3083	0.3469
<b>0.65</b>	2.0208	2.0836	0.3387	0.3996	2.0300	2.0940	0.3479	0.4086	2.0390	2.1042	0.3570	0.4172
<b>0.70</b>	1.9812	<b>2.0652</b>	0.3871	0.4667	1.9914	<b>2.0767</b>	0.3975	0.4752	2.0014	<b>2.0879</b>	0.4077	0.4832
<b>0.75</b>	1.9588	2.0663	0.4371	0.5278	1.9700	2.0786	0.4484	0.5348	1.9810	2.0903	0.4597	0.5409
<b>0.80</b>	<b>1.9502</b>	2.0824	0.4879	0.5801	<b>1.9624</b>	2.0949	0.5003	0.5844	<b>1.9742</b>	2.1068	0.5125	0.5873
<b>0.85</b>	1.9527	2.1094	0.5391	0.6216	1.9657	2.1217	0.5524	0.6223	1.9783	2.1331	0.5654	0.6213
<b>0.90</b>	1.9639	2.1438	0.5901	0.6520	1.9776	2.1554	0.6041	0.6486	1.9907	2.1660	0.6178	0.6438
<b>0.95</b>	1.9817	2.1830	0.6402	0.6722	1.9959	2.1937	0.6549	0.6654	2.0094	2.2033	0.6691	0.6575
<b>3 1.00</b>	2.0042	2.2250	0.6889	0.6849	2.0188	2.2347	0.7040	0.6757	2.0326	2.2435	0.7187	0.6664
<b>1.05</b>	2.0300	2.2450	0.7355	0.6255	2.0447	2.2611	0.7510	0.6354	2.0586	2.2758	0.7658	0.6447
<b>1.10</b>	2.0576	2.3042	0.7797	0.6761	2.0723	2.3198	0.7952	0.6857	2.0860	2.3338	0.8101	0.6947
<b>1.15</b>	2.0859	2.3635	0.8208	0.7226	2.1003	2.3782	0.8364	0.7317	2.1137	2.3912	0.8511	0.7401
<b>1.20</b>	2.1137	2.4211	0.8587	0.7640	2.1278	2.4345	0.8740	0.7722	2.1407	2.4460	0.8885	0.7797
<b>1.25</b>	2.1404	2.4750	0.8929	0.7993	2.1540	2.4867	0.9079	0.8064	2.1663	2.4964	0.9220	0.8125
<b>1.30</b>	2.1653	2.5237	0.9233	0.8279	2.1783	2.5336	0.9379	0.8334	2.1899	2.5412	0.9515	0.8380
<b>1.35</b>	2.1879	2.5663	0.9499	0.8493	2.2002	2.5739	0.9640	0.8530	2.2110	2.5792	0.9771	0.8556
<b>1.40</b>	2.2080	2.6018	0.9728	0.8631	2.2195	2.6070	0.9863	0.8646	2.2295	2.6100	0.9988	0.8651
<b>1.45</b>	2.2253	2.6298	0.9921	0.8693	2.2360	2.6326	1.0050	0.8684	2.2453	2.6331	1.0169	0.8663
<b>1.50</b>	2.2400	2.6503	1.0081	0.8679	2.2500	2.6507	1.0204	0.8643	2.2585	2.6487	1.0318	0.8595

Fonte: A Autora (2021)

Tabela 8 – Resultados para dois pontos a priori quando  $p_1 = 0.8$ ,  $\pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$  (continua)

$\beta$	$T$	$p_2 = 0.9$				$p_2 = 0.95$				$p_2 = 1$			
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL
	<b>0.50</b>	2.62396	2.70208	0.41469	0.41106	2.63897	2.71823	0.42845	0.41772	2.65385	2.73412	0.44211	0.42382
	<b>0.55</b>	2.50069	2.59436	0.45269	0.45057	2.51693	2.61318	0.46756	0.46374	2.53300	2.63172	0.48229	0.47667
	<b>0.60</b>	2.40665	2.52006	0.48974	0.50305	2.42405	2.54020	0.50563	0.51639	2.44122	2.55995	0.52136	0.52934
	<b>0.65</b>	2.33476	2.46672	0.52575	0.54444	2.35324	2.48785	0.54260	0.55697	2.37143	2.50847	0.55925	0.56893
	<b>0.70</b>	2.27995	2.42884	0.56067	0.57550	2.29942	2.45062	0.57840	0.58644	2.31855	2.47176	0.59587	0.59664
	<b>0.75</b>	2.23847	2.40245	0.59444	0.59747	2.25885	2.42459	0.61295	0.60632	2.27882	2.44595	0.63117	0.61430
	<b>0.80</b>	2.20751	2.38471	0.62699	0.61192	2.22871	2.40698	0.64621	0.61848	2.24944	2.42836	0.66508	0.62411
	<b>0.85</b>	2.18489	2.37362	0.65827	0.62065	2.20683	2.39587	0.67812	0.62500	2.22822	2.41715	0.69755	0.62844
	<b>0.90</b>	2.16893	2.36781	0.68825	0.62551	2.19152	2.38998	0.70863	0.62795	2.21347	2.41112	0.72855	0.62964
	<b>0.95</b>	2.15827	2.36633	0.71688	0.62826	2.18143	<b>2.38845</b>	0.73771	0.62929	2.20385	<b>2.40949</b>	0.75802	0.62982
2	<b>1.00</b>	2.15184	2.36858	0.74413	0.63049	2.17548	2.39070	0.76534	0.63070	2.19829	2.41176	0.78595	0.63073
	<b>1.05</b>	2.14877	<b>2.36566</b>	0.76999	0.61012	2.17279	2.39219	0.79148	0.62191	<b>2.19591</b>	2.41730	0.81233	0.63306
	<b>1.10</b>	<b>2.14834</b>	2.38277	0.79443	0.63874	<b>2.17267</b>	2.40926	0.81614	0.65004	2.19601	2.43418	0.83713	0.66062
	<b>1.15</b>	2.14996	2.40013	0.81746	0.66210	2.17452	2.42634	0.83931	0.67255	2.19800	2.45082	0.86038	0.68219
	<b>1.20</b>	2.15314	2.41703	0.83907	0.68019	2.17786	2.44273	0.86098	0.68945	2.20141	2.46655	0.88207	0.69781
	<b>1.25</b>	2.15749	2.43291	0.85927	0.69306	2.18230	2.45788	0.88119	0.70082	2.20585	2.48083	0.90223	0.70760
	<b>1.30</b>	2.16267	2.44731	0.87809	0.70084	2.18751	2.47136	0.89996	0.70684	2.21100	2.49327	0.92089	0.71177
	<b>1.35</b>	2.16841	2.45989	0.89554	0.70372	2.19321	2.48286	0.91730	0.70773	2.21660	2.50358	0.93809	0.71061
	<b>1.40</b>	2.17449	2.47043	0.91166	0.70194	2.19920	2.49218	0.93327	0.70379	2.22243	2.51160	0.95387	0.70445
	<b>1.45</b>	2.18071	2.47877	0.92649	0.69577	2.20530	2.49921	0.94791	0.69535	2.22834	2.51725	0.96828	0.69370
	<b>1.50</b>	2.18694	2.48484	0.94007	0.68555	2.21136	2.50391	0.96127	0.68278	2.23417	2.52054	0.98140	0.67878

Tabela 8 – Resultados para dois pontos a priori quando  $p_1 = 0.8$ ,  $\pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$  (continuação)

$\beta$	$T$	$p_2 = 0.9$				$p_2 = 0.95$				$p_2 = 1$		
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico
<b>0.50</b>	2.42716	2.46839	0.29424	0.30830	2.43734	2.47896	0.30407	0.31162	2.44745	2.48935	0.31385	0.31420
<b>0.55</b>	2.30748	2.36100	0.33648	0.34865	2.31899	2.37410	0.34759	0.35937	2.33040	2.38704	0.35863	0.36996
<b>0.60</b>	2.21964	2.29167	0.37953	0.41404	2.23245	2.30638	0.39191	0.42579	2.24512	2.32087	0.40417	0.43727
<b>0.65</b>	2.15624	2.24848	0.42308	0.47423	2.17030	2.26459	0.43667	0.48598	2.18417	2.28035	0.45010	0.49725
<b>0.70</b>	2.11186	2.22510	0.46680	0.52655	2.12711	2.24225	0.48154	0.53718	2.14211	2.25891	0.49607	0.54703
<b>0.75</b>	2.08244	<b>2.21652</b>	0.51038	0.56943	2.09880	<b>2.23430</b>	0.52618	0.57786	2.11483	<b>2.25141</b>	0.54173	0.58522
<b>0.80</b>	2.06484	2.21879	0.55350	0.60233	2.08220	2.23677	0.57027	0.60777	2.09916	2.25391	0.58674	0.61193
<b>0.85</b>	2.05657	2.22884	0.59586	0.62576	2.07482	2.24665	0.61350	0.62783	<b>2.09258</b>	2.26348	0.63076	0.62857
<b>0.90</b>	<b>2.05562</b>	2.24442	0.63717	0.64115	<b>2.07463</b>	2.26181	0.65556	0.63996	2.09305	2.27814	0.67349	0.63762
<b>0.95</b>	2.06033	2.26398	0.67717	0.65059	2.07997	2.28085	0.69617	0.64675	2.09892	2.29668	0.71464	0.64218
<b>2,5 1.00</b>	2.06935	2.28654	0.71560	0.65656	2.08947	2.30297	0.73508	0.65107	2.10880	2.31844	0.75396	0.64547
<b>1.05</b>	2.08152	2.29709	0.75224	0.62054	2.10198	2.31966	0.77206	0.63242	2.12154	2.34083	0.79120	0.64365
<b>1.10</b>	2.09589	2.33646	0.78689	0.66142	2.11654	2.35882	0.80692	0.67298	2.13619	2.37959	0.82619	0.68380
<b>1.15</b>	2.11164	2.37618	0.81940	0.69796	2.13235	2.39799	0.83950	0.70884	2.15195	2.41802	0.85878	0.71889
<b>1.20</b>	2.12810	2.41492	0.84962	0.72942	2.14874	2.43584	0.86969	0.73925	2.16817	2.45481	0.88884	0.74815
<b>1.25</b>	2.14472	2.45155	0.87749	0.75524	2.16517	2.47126	0.89740	0.76363	2.18431	2.48884	0.91633	0.77098
<b>1.30</b>	2.16105	2.48512	0.90294	0.77502	2.18120	2.50332	0.92260	0.78159	2.19996	2.51925	0.94123	0.78703
<b>1.35</b>	2.17673	2.51490	0.92598	0.78851	2.19650	2.53132	0.94530	0.79292	2.21481	2.54536	0.96355	0.79610
<b>1.40</b>	2.19149	2.54033	0.94662	0.79562	2.21081	2.55477	0.96554	0.79755	2.22861	2.56673	0.98336	0.79816
<b>1.45</b>	2.20515	2.56106	0.96494	0.79637	2.22397	2.57335	0.98341	0.79557	2.24122	2.58313	1.00077	0.79337
<b>1.50</b>	2.21759	2.57690	0.98103	0.79093	2.23587	2.58695	0.99903	0.78720	2.25256	2.59450	1.01590	0.78202

Tabela 8 – Resultados para dois pontos a priori quando  $p_1 = 0.8$ ,  $\pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$  (conclusão)

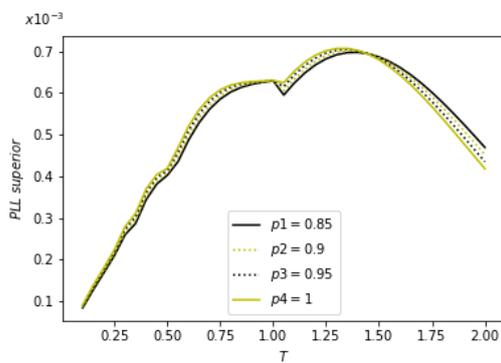
$\beta$	$T$	$p_2 = 0.9$				$p_2 = 0.95$				$p_2 = 1$			
		$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL	$B(T)$ VPF Fixo	$B(T)$ VPF Variável	PLL assintótico	Limite superior do PLL
	<b>0.50</b>	2.29564	2.31713	0.20927	0.22866	2.30267	2.32427	0.21632	0.22997	2.30967	2.33127	0.22335	0.23040
	<b>0.55</b>	2.17320	2.20338	0.25096	0.26594	2.18153	2.21265	0.25933	0.27442	2.18980	2.22185	0.26764	0.28282
	<b>0.60</b>	2.08536	2.13030	0.29549	0.33384	2.09502	2.14125	0.30520	0.34384	2.10459	2.15206	0.31485	0.35366
	<b>0.65</b>	2.02461	2.08788	0.34244	0.40339	2.03561	2.10043	0.35352	0.41414	2.04647	2.11275	0.36449	0.42449
	<b>0.70</b>	1.98541	<b>2.07005</b>	0.39136	0.47045	1.99772	<b>2.08395</b>	0.40378	0.48075	2.00984	<b>2.09748</b>	0.41605	0.49032
	<b>0.75</b>	1.96348	2.07161	0.44174	0.53121	1.97704	2.08644	0.45545	0.53963	1.99034	2.10072	0.46896	0.54688
	<b>0.80</b>	<b>1.95539</b>	2.08797	0.49303	0.58264	<b>1.97009</b>	2.10317	0.50794	0.58775	<b>1.98447</b>	2.11760	0.52259	0.59128
	<b>0.85</b>	1.95830	2.11504	0.54464	0.62291	1.97403	2.13001	0.56064	0.62366	1.98933	2.14400	0.57631	0.62256
	<b>0.90</b>	1.96983	2.14939	0.59597	0.65172	1.98642	2.16359	0.61291	0.64773	2.00248	2.17668	0.62943	0.64198
	<b>0.95</b>	1.98790	2.18832	0.64640	0.67044	2.00516	2.20145	0.66411	0.66221	2.02178	2.21349	0.68131	0.65279
<b>3</b>	<b>1.00</b>	2.01071	2.22999	0.69533	0.68181	2.02844	2.24206	0.71361	0.67073	2.04539	2.25323	0.73129	0.65953
	<b>1.05</b>	2.03667	2.25258	0.74218	0.62980	2.05464	2.27234	0.76083	0.64170	2.07172	2.29070	0.77878	0.65292
	<b>1.10</b>	2.06440	2.31181	0.78644	0.68034	2.08239	2.33105	0.80525	0.69193	2.09936	2.34867	0.82326	0.70275
	<b>1.15</b>	2.09269	2.37105	0.82765	0.72670	2.11049	2.38930	0.84642	0.73762	2.12714	2.40573	0.86430	0.74769
	<b>1.20</b>	2.12055	2.42827	0.86545	0.76780	2.13795	2.44509	0.88398	0.77767	2.15410	2.45989	0.90156	0.78661
	<b>1.25</b>	2.14716	2.48172	0.89958	0.80272	2.16399	2.49667	0.91771	0.81116	2.17948	2.50945	0.93482	0.81857
	<b>1.30</b>	2.17189	2.52991	0.92988	0.83077	2.18802	2.54264	0.94749	0.83737	2.20273	2.55307	0.96402	0.84286
	<b>1.35</b>	2.19429	2.57173	0.95633	0.85144	2.20962	2.58194	0.97330	0.85583	2.22348	2.58978	0.98918	0.85901
	<b>1.40</b>	2.21410	2.60642	0.97899	0.86445	2.22856	2.61391	0.99528	0.86627	2.24155	2.61901	1.01047	0.86679
	<b>1.45</b>	2.23120	2.63358	0.99805	0.86970	2.24479	2.63825	1.01362	0.86863	2.25691	2.64055	1.02812	0.86615
	<b>1.50</b>	2.24562	2.65315	1.01376	0.86729	2.25837	2.65498	1.02864	0.86304	2.26966	2.65450	1.04247	0.85729

Fonte: A Autora (2021)

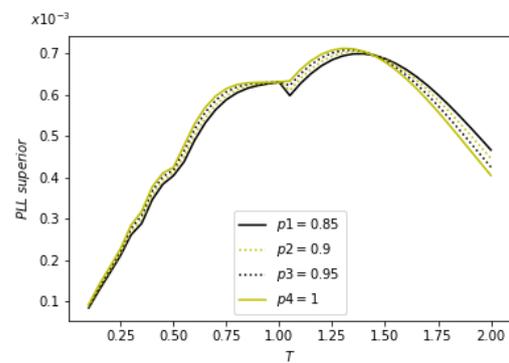
As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados para dois pontos a priori quando  $\pi_1 = \pi_2 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$ .

Ao abordar o risco, a Figura 19 apresenta a forma como o limite superior do PLL se comporta quando  $\beta$  e  $p$  variam. Para os valores considerados na ilustração, em todos os casos o PLL superior se mostrou dentro da região ALARP. Semelhante a situação de um ponto a priori, por ser considerado um modelo probabilístico que conduz os valores em um horizonte de tempo infinito, mesmo ocorrendo o aumento de  $p$  os reparos imperfeitos ainda podem ocorrer por seguirem uma distribuição de probabilidade.

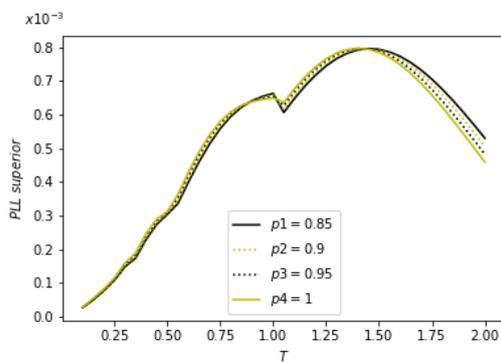
Figura 19 – PLL superior para dois pontos a priori variando  $\beta$  e  $\pi$



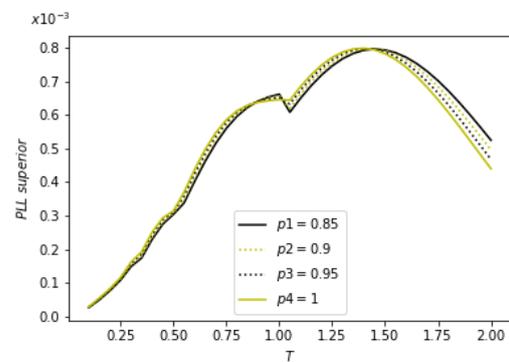
(a)  $\beta = 2, \pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$



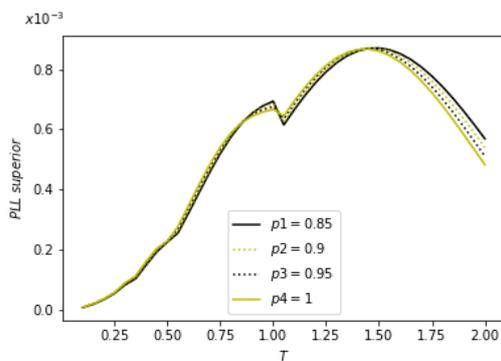
(b)  $\beta = 2, \pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$



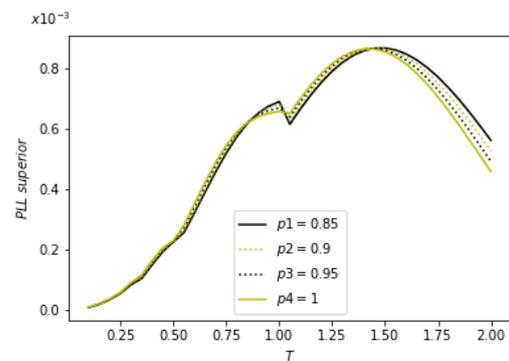
(c)  $\beta = 2,5, \pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$



(d)  $\beta = 2,5, \pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$



(e)  $\beta = 3, \pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$



(f)  $\beta = 3, \pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$

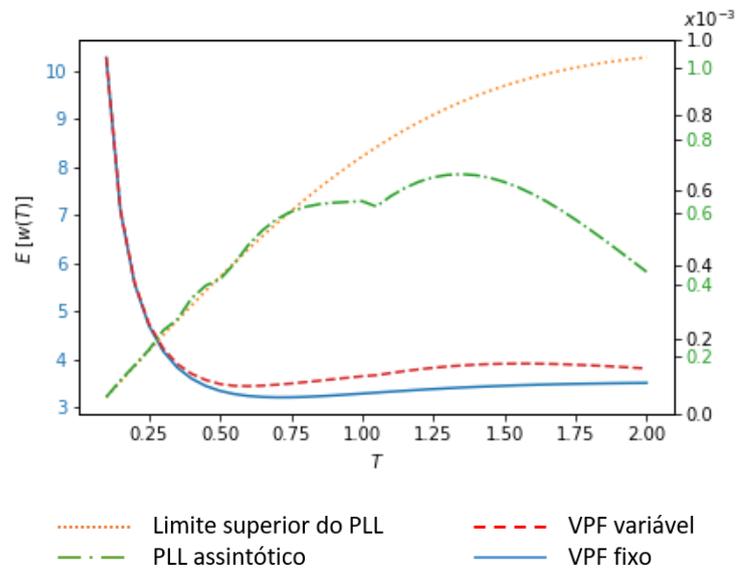
Fonte: A Autora (2021)

### 8.2.2 Caso de um ciclo de substituição

O custo esperado de um ciclo de substituição para dois pontos *a priori* é obtido por meio das Equações (4.21) e (4.22) e a utilização das Equações (5.6) a (5.11).

A Figura 20 apresenta o custo de um ciclo de substituição para VPF fixo (linha azul) e o VPF crescente (linha vermelha) para o caso em que  $p_1 = 0.8$ ,  $p_2 = 0.95$ ,  $\pi_1 = 0.5$  e  $\pi_2 = 0.5$ .

Figura 20 – Custo de um ciclo de substituição para dois pontos *a priori* para  $\beta = 2$



Fonte: A Autora (2021)

Quando o VPF é fixo a idade ideal de substituição é  $T^* = 0.70$ , sendo o menor custo de um ciclo de substituição igual a 2.034. Ao passo que, ao se empregar o VPF crescente a idade ideal de substituição é  $T^* = 0.60$  e o menor custo de um ciclo de substituição é igual a 3.4379.

Ao utilizar  $\pi_1 = 0.4$  e  $\pi_2 = 0.6$ , quando o VPF é fixo a idade ideal de substituição é  $T^* = 0.70$  e  $E[W(T^*)] = 2.2270$ . Por sua vez, quando o VPF é crescente a idade ideal de substituição é  $T^* = 0.60$  e o menor custo de um ciclo de substituição é igual a  $E[W(T^*)] = 3.4635$ .

Para os valores analisados, a idade ótima de substituição não mudou e o custo ótimo sofreu uma variação pouco expressiva com a alteração de  $\pi$ .

### 8.2.3 Síntese dos resultados para dois pontos *a priori*

Com o auxílio das Tabelas 7 e 8 foi elaborada a Tabela 9 que possui as idades ótimas de substituição e os seus referentes custos. No que concerne à idade ótima de substituição, observa-se o seu aumento quando  $\beta$  cresce, há uma leve diminuição quando  $p$  muda e quase

não há variação quando  $\pi$  é alterado. Assim entende-se que o parâmetro de forma e a qualidade do reparo influenciam mais na idade de substituição do que as distribuições *a priori*.

Entretanto, é interessante que as distribuições *a priori* sejam consideradas no modelo para que as incertezas sejam englobadas e os tomadores de decisão tenham maior suporte em suas escolhas. Além disso, boa parte das ações de manutenção ainda são realizadas por humanos e estes são propensos a erros pela deficiência na documentação, na comunicação, nas ferramentas e nas metodologias, bem como por dificuldades que podem surgir no momento da atividade de manutenção (MORAG *et al.*, 2018). Assim, por conta da alta interação entre os mantenedores e os equipamentos faz-se necessário considerar a possibilidade de falha humana.

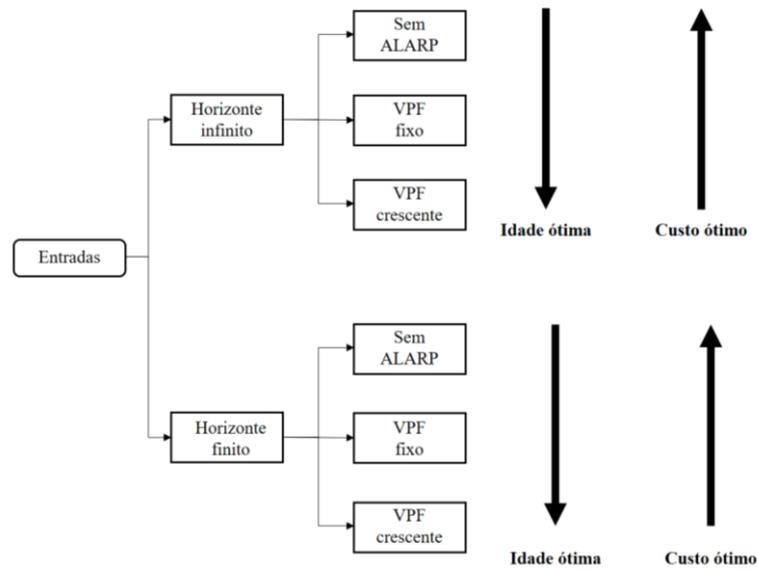
Tabela 9 – Síntese dos resultados para 2 pontos *a priori* (horizonte infinito)

$\beta$	$\pi$	VPF	$p_2 = 0.9$		$p_2 = 0.95$		$p_2 = 1$	
			$T^*$	$B(T^*)$	$T^*$	$B(T^*)$	$T^*$	$B(T^*)$
$\beta = 2$	$\pi_1 = 0.5$ e $\pi_2 = 0.5$	Fixo	1.10	2.139	1.10	2.159	1.10	2.178
		Variável	1.05	2.356	0.95	2.376	0.95	2.393
	$\pi_1 = 0.4$ e $\pi_2 = 0.6$	Fixo	1.10	2.148	1.10	2.173	1.05	2.196
		Variável	1.05	2.366	0.95	2.388	0.95	2.409
$\beta = 2.5$	$\pi_1 = 0.5$ e $\pi_2 = 0.5$	Fixo	0.90	2.049	0.90	2.064	0.90	2.080
		Variável	0.75	2.210	0.75	2.225	0.75	2.239
	$\pi_1 = 0.4$ e $\pi_2 = 0.6$	Fixo	0.9	2.056	0.90	2.075	0.85	2.093
		Variável	0.75	2.217	0.75	2.234	0.75	2.251
$\beta = 3$	$\pi_1 = 0.5$ e $\pi_2 = 0.5$	Fixo	0.80	1.950	0.80	1.962	0.80	1.974
		Variável	0.70	2.065	0.70	2.077	0.70	2.088
	$\pi_1 = 0.4$ e $\pi_2 = 0.6$	Fixo	0.80	1.955	0.80	1.970	0.80	1.984
		Variável	0.70	2.070	0.70	2.084	0.70	2.097

Fonte: A Autora (2021)

A Figura 21 resume o comportamento da idade ótima e do custo ótimo de substituição para um e dois pontos *a priori*. Tanto para o horizonte de planejamento infinito quanto finito, a idade ótima de substituição diminui e o custo ótimo aumenta à medida que o risco é introduzido e elevado ao longo do tempo. Além disso, quando a probabilidade de reparo perfeito aumenta, a idade ótima diminui e o custo aumenta, este comportamento é mais perceptível no caso de um ponto *a priori*.

Figura 21 – Síntese do desempenho da idade ótima e do custo ótimo



Fonte: A Autora (2021)

### 8.3 QUATRO PONTOS A *PRIORI*

O número de pontos *a priori* sofrerá variações de acordo com a quantidade de equipes de manutenção. Ao trabalhar com quatro pontos *a priori*, supõe-se que a organização possui  $k = 4$  equipes de reparo composta por seus respectivos mantenedores que possuem diferentes habilidades de reparo e são solicitados de forma aleatória para reparar um sistema com falha.

Para essa situação,  $P$  é considerada uma variável aleatória com a seguinte distribuição.

$$P = \begin{cases} p_1 & \text{com probabilidade } \pi_1 \\ p_2 & \text{com probabilidade } \pi_2 \\ p_3 & \text{com probabilidade } \pi_3 \\ p_4 & \text{com probabilidade } \pi_4 \end{cases} \quad (5.12)$$

De forma que  $\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1$ , então, tem-se as seguintes equações para o contexto de quatro pontos *a priori*.

$$\bar{H}(t) = \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_3 e^{-p_3 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_4 e^{-p_4 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (5.13)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\theta} t^{\beta-1} \left( p_1 \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_2 \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_3 \pi_3 e^{-p_3 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_4 \pi_4 e^{-p_4 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \right) \quad (5.14)$$

$$r_H(t) = \frac{\beta}{\theta} t^{\beta-1} \left( \frac{p_1 \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_2 \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_3 \pi_3 e^{-p_3 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + p_4 \pi_4 e^{-p_4 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}}{\pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_3 e^{-p_3 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_4 e^{-p_4 \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}} \right) \quad (5.15)$$

$$r_G(t) = \frac{\beta}{\theta} t^{\beta-1} \left( \frac{(1-p_1) \pi_1 e^{-(1-p_1) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + (1-p_2) \pi_2 e^{-(1-p_2) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + (1-p_3) \pi_3 e^{-(1-p_3) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + (1-p_4) \pi_4 e^{-(1-p_4) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}}{\pi_1 e^{-(1-p_1) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-(1-p_2) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_3 e^{-(1-p_3) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} + \pi_4 e^{-(1-p_4) \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}} \right) \quad (5.16)$$

$$R(T) = \left\{ \begin{array}{l} \left[ 1 - \left( \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{T}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{T}{\theta}\right)^\beta} + \pi_3 e^{-p_3 \left(\frac{T}{\theta}\right)^\beta} + \pi_4 e^{-p_4 \left(\frac{T}{\theta}\right)^\beta} \right) \right] \left( 1 + \left[ \frac{u}{T} \right] \right) \\ -1 - \left( \pi_1 e^{-p_1 \left(\frac{T - \left(u - \left[\frac{u}{T}\right] T\right)}{\theta}\right)^\beta} + \pi_2 e^{-p_2 \left(\frac{T - \left(u - \left[\frac{u}{T}\right] T\right)}{\theta}\right)^\beta} + \pi_3 e^{-p_3 \left(\frac{T - \left(u - \left[\frac{u}{T}\right] T\right)}{\theta}\right)^\beta} + \pi_4 e^{-p_4 \left(\frac{T - \left(u - \left[\frac{u}{T}\right] T\right)}{\theta}\right)^\beta} \right) \right] \end{array} \right\} p_A PLL_A \quad (5.17)$$

#### 8.4 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

O aumento da ênfase na produção sustentável requer o maior comprometimento das empresas com a preservação do meio ambiente e desenvolvimento da sociedade. Ao reduzir os riscos de acidente e os impactos negativos a natureza, as organizações adquirem vantagens, a saber, conformidade com a legislação ambiental, maior competitividade, melhor credibilidade por parte da comunidade circunvizinha e dos clientes, bem como melhoraria nos seus processos internos (PETERSON *et al.*, 2021).

Por outro lado, as falhas em sistemas produtivos podem ocasionar grandes perdas econômicas, sociais e ambientais, de tal modo que as organizações precisam criar estratégias que contribuam para a minimização de acidentes e os riscos devem ser identificados, analisados e tratados.

A manutenção dos equipamentos influencia na confiabilidade e, conseqüentemente, na segurança dos sistemas. Por isso, quando as ações de manutenção são realizadas de maneira eficaz, podem cooperar para a minimização dos riscos de acidentes.

Em termos gerenciais, a aplicação do modelo proposto permite que as equipes envolvidas com a gestão da manutenção trabalhem de maneira associada os custos de manutenção, a confiabilidade dos equipamentos e os riscos envolvidos na tomada de decisão sobre as idades de substituição.

A aplicação desse modelo permite que sejam decididas as idades ótimas de substituição, ou seja, aquelas que minimizem os custos e permitam que o risco se enquadre na região de risco ALARP ou na região amplamente aceitável. A escolha da quantidade de pontos *a priori*, do

horizonte de planejamento e do uso do fator de desproporção dependerá da quantidade de equipes envolvidas, das exigências relacionadas à exposição ao risco e das preferências dos gestores de manutenção, de acordo com o contexto em questão.

O fato de admitir que o reparo pode ser imperfeito aproxima o modelo da realidade, quando comparado com os modelos que consideram que o sistema é sempre restaurado perfeitamente, pois as atividades de manutenção podem apresentar erros resultantes de deficiências relacionadas as pessoas envolvidas, as metodologias aplicadas e a tecnologia utilizada.

Tanto as ações de manutenção quanto a análise de risco agregam incertezas, por exemplo, quanto a qualidade da ação de manutenção, o tempo em que os equipamentos irão falhar, as consequências das falhas, bem como a ausência ou a imprecisão dos dados. Diante disso, o uso das distribuições *a priori* no modelo proposto admite que o conhecimento dos especialistas seja considerado para que algumas dessas incertezas sejam englobadas.

Todavia, é importante destacar que o uso da probabilidade bayesiana não exclui a necessidade de revisão e julgamento dos decisores após as análises numéricas. Para casos em que as decisões apresentam alto impacto na segurança é interessante, por exemplo, a criação de um “Conselho de Segurança” formado por especialistas multidisciplinares para uma discussão mais ampla (VATN; AVEN, 2010).

Tendo em vista a importância do processo de decisão ser informado sobre risco e a necessidade de informações confiáveis e precisas, acredita-se que quanto mais informações úteis as equipes usufruírem, melhor o conhecimento da equipe e maior a perspectiva de boas decisões. Assim, espera-se que o modelo proposto contribua para a inclusão de mais informações relevantes para os processos de tomada de decisão em gestão da manutenção e apoie os gestores em situações conflitantes entre risco e manutenção.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da necessidade de integração entre a gestão de manutenção e o gerenciamento de risco nas organizações, este trabalho teve como objetivo propor uma política de substituição por idade com reparo imperfeito bayesiano que considera o risco e analisar como a incerteza da qualidade da ação de manutenção impacta no ALARP.

Para isso, foi realizada uma revisão da literatura para averiguar as principais áreas de aplicação do princípio ALARP e como a gestão de manutenção tem integrado este princípio em suas atividades, onde percebeu-se a carência de trabalhos que associem o ALARP e as políticas de manutenção. Na sequência, foi proposta uma política de substituição por idade que implementa o princípio ALARP, em combinação com critérios de aceitação de risco e o reparo imperfeito bayesiano.

Os resultados da aplicação numérica demonstraram que os casos que se basearam no VPF crescente apresentaram uma idade ótima de substituição menor e o custo de substituição de longo prazo maior. Isso ocorreu porque o fator de desproporção se tornou maior ao longo do tempo, ocasionando o crescimento do índice de risco e do custo, por isso, tornou-se mais conservador substituir o equipamento em uma idade menor.

Quando foram considerados dois pontos *a priori* percebeu-se que o parâmetro de forma e a qualidade do reparo influenciaram consideravelmente na idade de substituição, enquanto as distribuições *a priori* apresentaram um impacto menor. Ademais, a análise de sensibilidade apontou que o modelo se comportou como esperado quando submetidos a diferentes variações, apresentando bom desempenho. Com isso, o modelo proposto se mostra adequado para ser utilizado em casos reais para apoiar decisões que compreendam gestão de risco e gestão de manutenção.

### 9.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

O presente trabalho proporciona contribuições para a literatura e para a prática. No que tange às contribuições científicas, listam-se:

- Por meio da revisão da literatura, mostrou-se a tendência das publicações relacionadas ao princípio ALARP no que tange ao período de publicação, os periódicos e as áreas de interesse. Notou-se o crescimento no número de trabalhos sobre o ALARP e que os ramos nuclear, químico e petrolífero são os que possuem maior interesse em pesquisas em torno desse princípio.

- Percebeu-se que o Brasil não apresentou publicações sobre a utilização do princípio ALARP, fato que pode apontar para deficiência na implementação das leis ambientais brasileiras.
- Apresentou-se os trabalhos que fizeram uso do ALARP para apoiar a gestão da manutenção e notou-se a carência de trabalhos com essa temática, bem como a necessidade de trabalhos que considerem erros durante as ações de manutenção.
- A proposição da política de substituição por idade contribuiu para a redução da lacuna sobre a aplicação de princípios de gestão de risco nos modelos de manutenção imperfeita. Ademais, a consideração do conhecimento *a priori* no modelo é de relevante contribuição para problemas cuja confiabilidade é alta e não há elevada quantidade de informações.

Referente as contribuições práticas, tem-se:

- Foi elaborado e aplicado numericamente um modelo de substituição por idade baseado em reparo imperfeito bayesiano com implementação do princípio ALARP, em combinação com critérios de aceitação de risco.
- A aplicação numérica englobou o caso do horizonte infinito e de um ciclo de substituição. Desta maneira, pode ser empregado tanto em situações estáveis ao longo do tempo quanto para casos em que os ciclos sofrem alterações.
- A implementação do VPF fixo e do VPF crescente torna o modelo adaptável tanto para circunstâncias em que os decisores precisam ser mais conservadores em relação a segurança quanto em ocasiões onde se tem uma maior permissividade no que tange as restrições de risco.
- O modelo proposto pode auxiliar as empresas em suas estratégias de manutenção nas situações em que há conflito entre gestão de risco e manutenção.
- A utilização de modelos de manutenção adequados, colabora para a tomada de decisão assertiva, de forma que os acidentes podem ser prevenidos culminando em benefícios para a sociedade, o meio ambiente e a economia.

## 9.2 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

As limitações de aplicação do modelo incluem a necessidade de obtenção dos dados de entrada, por exemplo, as distribuições de probabilidade, os custos, os tempos e determinação dos valores requeridos para desenvolvimento do índice de risco.

Em trabalhos futuros sugere-se a exploração do uso de outras políticas e modelos de substituição para análise do comportamento do custo e do risco, por exemplo, considerar que os de manutenção são crescentes. Além disso, como extensão deste trabalho, pode ser desenvolvido um *software* que receba os dados de entrada do modelo, calcule os resultados e os apresente ao usuário. Desta forma, a interface deve mostrar-se interativa e possuir linguagem acessível mesmo para usuários que não possuam conhecimentos específicos sobre os pormenores da construção do modelo matemático.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, M.; SHAFIEE, M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. **Marine Structures**, [s. l.], v. 71, n. Mai. 2020, p. 102718, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102718>>.
- ABRAHAMSEN, E. B. *et al.* Using the ALARP principle for safety management in the energy production sector of chemical industry. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 169, n. Jan. 2018, p. 160–165, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.08.014>>.
- ASHIOFU, A.; BRUCE-BLACK, J.; DYER, J. Leveraging facility siting to optimize mitigation decisions. **Process Safety Progress**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 1–13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/prs.12188>>.
- AVEN, T. Bayesian analysis: Critical issues related to its scope and boundaries in a risk context. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 204, n. Dez. 2020, p. 107209, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107209>>.
- AVEN, T. On how to define, understand and describe risk. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 95, n. 6, p. 623–631, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.01.011>>.
- AVEN, T. On the meaning of a black swan in a risk context. **Safety Science**, [s. l.], v. 57, n. Ago. 2013, p. 44–51, 2013a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.01.016>>.
- AVEN, T. Perspectives on risk in a decision-making context - Review and discussion. **Safety Science**, [s. l.], v. 47, n. 6, p. 798–806, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.008>>.
- AVEN, T. Practical implications of the new risk perspectives. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 115, p. 136–145, 2013b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.020>>.
- AVEN, T.; ABRAHAMSEN, E. On the use of cost-benefit analysis in ALARP processes. **International Journal of Performability Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 345–353, 2007.
- AVEN, T.; CASTRO, I. T. A delay-time model with safety constraint. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 94, n. 2, p. 261–267, 2009. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.res.2008.03.004>>.

AVEN, T.; CASTRO, I. T. A minimal repair replacement model with two types of failure and a safety constraint. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 188, n. 2, p. 506–515, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.04.038>>.

AVEN, T.; FLAGE, R. Foundational Challenges for Advancing the Field and Discipline of Risk Analysis. **Risk Analysis**, [s. l.], 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/risa.13496>>.

BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. **Mathematical Theory of Reliability**. New York: John Wiley & Sons, 1965.

BARLOW, R.; HUNTER, L. Optimum Preventive Maintenance Policies. **Operations Research**, [s. l.], v. 8, p. 90–100, 1960.

BAYBUTT, P. The ALARP Principle in Process Safety. **Process Safety Progress**, [s. l.], v. 33 (1), p. 36–40, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/prs.11599>>.

BRENNAN, P. D. *et al.* Maintenance of the JET active gas handling system. **Fusion Engineering and Design**, [s. l.], v. 69, n. 1-4 SPEC, p. 71–74, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(03\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(03)00246-1)>.

BROWN, A. *et al.* Use of risk-based methods to evaluate spillway capacity: Case histories. **Dams and Reservoirs**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 120–133, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/jdare.15.00006>>.

BROWN, E. T. Reducing risks in the investigation, design and construction of large concrete dams. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 197–209, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.002>>.

BROWN, M.; PROSCHAN, F. **Imperfect maintenance**. [S. l.]: Institute of Mathematical Statistics, 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1214/lnms/1215464848>>.

BROWN, M.; PROSCHAN, F. Imperfect Repair. **Journal of Applied Probability**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 851–859, 1983. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/S0021900200024153>>.

BRYANT, P. A.; CROFT, J.; COLE, P. Integration of risks from multiple hazards into a holistic ALARA/ALARP demonstration. **Journal of Radiological Protection**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 81–91, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa8e53>>.

CASSON MORENO, V. *et al.* Analysis of accidents in biogas production and upgrading. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 96, p. 1127–1134, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.017>>.

FIORENTINI, L. *et al.* “Offshore directive” on major accidents: A barrier-based safety management system built on shared ontologies and taxonomies. Real applications in Italy. **Chemical Engineering Transactions**, [s. l.], v. 67, p. 355–360, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3303/CET1867060>>.

FLAGE, R. Maintenance Optimization and Its Relation to Safety. **Handbook of Safety Principles**, [s. l.], p. 540–564, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9781119443070.ch24>>.

FLAGE, R. On risk reduction principles in the context of maintenance optimisation modelling. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, [s. l.], v. 227, n. 3, p. 241–250, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1748006X13489954>>.

FLAGE, R. *et al.* Safety constraints applied to an adaptive Bayesian condition-based maintenance optimization model. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 102, p. 16–26, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.01.006>>.

FLAGE, R.; AVEN, T. Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis. [s. l.], v. 2, n. 13, p. 9–18, 2009.

FONTENOT, R. A.; PROSCHAN, F. Some imperfect maintenance models. **Reliability Theory and Models**. Orlando: Academic Press, 1984.

FRENCH, S.; BEDFORD, T.; ATHERTON, E. Supporting ALARP decision making by cost benefit analysis and multiattribute utility theory. **Journal of Risk Research**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 207–223, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/1366987042000192408>>.

GHARABAGH, M. J. *et al.* Comprehensive risk assessment and management of petrochemical feed and product transportation pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 533–539, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.03.008>>.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GUAN, Q.; TANG, Y.; XU, A. Objective Bayesian analysis for competing risks model with

Wiener degradation phenomena and catastrophic failures. **Applied Mathematical Modelling**, [s. l.], v. 74, p. 422–440, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.04.063>>.

GUARIN, L.; KONOVESSIS, D.; VASSALOS, D. Safety level of damaged RoPax ships: Risk modelling and cost-effectiveness analysis. **Ocean Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 12–13, p. 941–951, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.06.005>>.

HAGHIGHI, F.; CASTANIER, B.; MISAIL, H. Rolling horizon optimal maintenance policy for a system subject to shocks and degradation under uncertain parameters. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 157, p. 107298, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107298>>.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. Reducing risks, protecting people. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], p. 1–74, 2001.

HERNANDES, E. *et al.* Using GQM and TAM to evaluate StArt – a tool that supports Systematic Review. **CLEI Electronic Journal**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.19153/cleiej.15.1.2>>.

HOPKIN, D.; FU, I.; VAN COILE, R. Adequate fire safety for structural steel elements based upon life-time cost optimization. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 120, n. Abr. 2020, p. 103095, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103095>>.

HUANG, Y.; MA, G.; LI, J. Multi-level explosion risk analysis (MLERA) for accidental gas explosion events in super-large FLNG facilities. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 45, p. 242–254, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.004>>.

IFEZUE, D.; TOBINS, F. H. Operational integrity management for a subsea gas export manifold: A case study. **Underwater Technology**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 95–104, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3723/ut.33.095>>.

JAHANIAN, H. Optimization, a rational approach to SIL determination. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 109, p. 452–464, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.04.015>>.

JAHANIAN, H.; MAHBOOB, Q. SIL determination as a utility-based decision process. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 102, p. 757–767, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.012>>.

JONES-LEE, M.; AVEN, T. ALARP - What does it really mean? **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 96, n. 8, p. 877–882, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.02.006>>.

KHATAB, A.; AGHEZZAF, E. Selective maintenance optimization when quality of imperfect maintenance actions are stochastic. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 150, p. 182–189, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.01.026>>.

KIM, K.; KANG, H.; KIM, Y. Risk assessment for natural gas hydrate carriers: A hazard identification (HAZID) study. **Energies**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 3142–3164, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en8043142>>.

KLETZ, T. A. Looking beyond ALARP: Overcoming its limitations. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 83, n. 2 B, p. 81–84, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1205/psep.04227>>.

KOBBACY, K. A. H.; MURTHY, D. N. P. **Complex System Maintenance Handbook**. 1. ed. London: Springer London, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7>>.

LEE, W. K. Risk assessment modeling in aviation safety management. **Journal of Air Transport Management**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 267–273, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2006.07.007>>.

LIM, J.-H.; LU, K.-L.; PARK, D. H. Bayesian imperfect repair model. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, [s. l.], v. 27 (4), n. June 2014, p. 965–984, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/03610929808832138>>.

LIM, J. H.; QU, J.; ZUO, M. J. Age replacement policy based on imperfect repair with random probability. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 149, p. 24–33, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.020>>.

LIM, Jae Hak; QU, J.; ZUO, M. J. Age replacement policy based on imperfect repair with random probability. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 149, p. 24–33, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.020>>.

LIND, N. Accountability, risk, and the ALARP (as Low as Reasonably Practicable) limit of benefit. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, [s. l.], v. 228, n. 2, p. 209–214, 2014. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1177/1748006X13512631>>.

LIU, S. *et al.* Risk post-assessment and management of a waste slag site under extreme scenarios. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [s. l.], v. 79, n. 5, p. 2659–2677, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10064-019-01697-7>>.

MAHBOOB, Q. *et al.* Investment into Human Risks in Railways and Decision Optimization. **Human and Ecological Risk Assessment**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 1299–1313, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10807039.2014.958375>>.

MALLETT, A. *et al.* Environmental impacts of mining in Brazil and the environmental licensing process: Changes needed for changing times? **The Extractive Industries and Society**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 100952, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.EXIS.2021.100952>>.

MOHAMMADFAM, I.; ZAREI, E. Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 40, n. 39, p. 13653–13663, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.117>>.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 6. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2014.

MORAG, I. *et al.* Identifying the causes of human error in maintenance work in developing countries. **International Journal of Industrial Ergonomics**, [s. l.], v. 68, n. July, p. 222–230, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.08.014>>.

NADERPOUR, M.; LU, J.; ZHANG, G. A situation risk awareness approach for process systems safety. **Safety Science**, [s. l.], v. 64, p. 173–189, 2014a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.12.005>>.

NADERPOUR, M.; LU, J.; ZHANG, G. An intelligent situation awareness support system for safety-critical environments. **Decision Support Systems**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 325–340, 2014b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.01.004>>.

NAKAGAWA, T.; YASUI, K. Optimum Policies for a System with Imperfect Maintenance. **IEEE Transactions on Reliability**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 631–633, 1987.

NATALIZIO, A.; PORFIRI, M. T.; PATEL, B. Collection and analysis of occupational radiation exposure data from the jet tokamak. **Fusion Engineering and Design**, [s. l.], v. 75–

79, p. 1193–1197, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.193>>.

NESTICÒ, A. *et al.* The ALARP principle in the Cost-Benefit analysis for the acceptability of investment risk. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 12, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su10124668>>.

NOH, Y.; CHANG, D. Methodology of exergy-based economic analysis incorporating safety investment cost for comparative evaluation in process plant design. **Energy**, [s. l.], v. 182, p. 864–880, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.028>>.

NUÑEZ-SANCHEZ, M. J. *et al.* Grounds for a safety level approach in the development of long-lasting regulations based on costs to reduce fatalities for sustaining industrial fishing vessel fleets. **Marine Policy**, [s. l.], v. 113, n. Dez. 2019, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103806>>.

OVERFIELD, R. E.; COLLINS, J. F. Quantitative risk assessment as a design tool - Recent FPSO experience. **International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production**, [s. l.], n. Jul. 2000, p. 26–28, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.2118/61469-ms>>.

PETERSON, M. *et al.* Sustainable Marketing and Consumer Support for Sustainable Businesses. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 27, p. 157–168, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.10.018>>.

PHAM, H.; WANG, H. Imperfect maintenance. [s. l.], v. 2217, n. 96, 1996.

PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. [S. l.: s. n.], 2013. ISSN 1098-6596. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Reference**. Versão 3.9.1. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <<http://www.python.org>>.

RIVERA-GÓMEZ, H. *et al.* Joint production, inspection and maintenance control policies for deteriorating system under quality constraint. **Journal of Manufacturing Systems**, [s. l.], v. 60, p. 585–607, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2021.07.018>>.

ROSS, S. M. Renewal Theory and Its Applications. *In*: INTRODUCTION TO PROBABILITY MODELS. [S. l.]: Elsevier, 2010. p. 421–495. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-375686-2.00003-0>>.

ROUT, B.; SIKDAR, B. Hazard identification, risk assessment, and control measures as an effective tool of occupational health assessment of hazardous process in an iron ore pelletizing industry. **Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 56, 2017. Disponível em: <[https://doi.org/10.4103/ijoem.IJOEM\\_19\\_16](https://doi.org/10.4103/ijoem.IJOEM_19_16)>.

RUIZ-HERNÁNDEZ, D.; PINAR-PÉREZ, J. M.; DELGADO-GÓMEZ, D. Multi-machine preventive maintenance scheduling with imperfect interventions : A restless bandit approach. **Computers and Operations Research**, [s. l.], v. 119, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104927>>.

RUUD, S.; MIKKELSEN, Å. Risk-based rules for crane safety systems. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 93, n. 9, p. 1369–1376, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.08.004>>.

SANCHEZ-SILVA, M.; ARROYO, O. Comparing target spectral design acceleration values by using different acceptability criteria. **Structural Safety**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 73–91, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2004.08.001>>.

SHEU, S. *et al.* A Bayesian perspective on age replacement with minimal repair. [s. l.], v. 65, n. Mar. 1998, p. 55–64, 1999.

SHEU, S. *et al.* Optimal replacement policies for a system based on a one-cycle criterion. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 191, n. June, p. 106527, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106527>>.

SRA. **Society for Risk Analysis Glossary**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.4135/9781412959216.n276>>.

SYED, Z.; LAWRYSHYN, Y. Multi-criteria decision-making considering risk and uncertainty in physical asset management. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, [s. l.], v. 65, n. Dez. 2019, p. 104064, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104064>>.

TALEB, N. N. **The Black Swan: the impact of the highly improbable**. London: Penguin, 2010.

TAYLOR, J. R. Can process plant QRA reduce risk? - experience of ALARP from 92 QRA studies over 36 Years. **Chemical Engineering Transactions**, [s. l.], v. 48, n. Puttock 1995, p. 811–816, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3303/CET1648136>>.

THODI, P.; KHAN, F.; HADDARA, M. Risk based integrity modeling of offshore process components suffering stochastic degradation. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 157–180, 2013. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1108/13552511311315968>>.

TOLEDO, M. L. G. de *et al.* ARA and ARI imperfect repair models : Estimation , goodness-of- fit and reliability prediction. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 140, p. 107–115, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.035>>.

TUAN, N. D.; YANN, D.; MITRA, F. Bayesian Analysis of the Brown–Proschan Model. **Stochastics and Quality Control**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 9–20, 2015.

UN ENVIRONMENT. **Environmental rule of law - First Global Report**. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019. *E-book*.

VAN COILE, R.; JOMAAS, G.; BISBY, L. Defining ALARP for fire safety engineering design via the Life Quality Index. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 107, n. Jul. 2018, p. 1–14, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.04.015>>.

VATN, J.; AVEN, T. An approach to maintenance optimization where safety issues are important. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.], v. 95, n. 1, p. 58–63, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.06.002>>.

WAGNER-GILLEN, P. K. How reactive hazard assessment and new reactor internals improve safety at the Shell Rhineland refinery. **Chemical Engineering Transactions**, [s. l.], v. 77, n. Jan., p. 511–516, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3303/CET1977086>>.

ZAMBONI, A. *et al.* **StArt - State of the Art through Systematic Review**. Versão 3.0.3. São Carlos: UFSCAR, 2010. Disponível em: <[http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start\\_tool](http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool)>.

ZECHERU, G.; LAMBRESCU, I. Determination of the Safety Distances Between Natural Gas Transmission Pipelines and Facilities in their Proximity. **Revista de Chimie**, [s. l.], v. 68, n. 2, p. 284–290, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.37358/rc.17.2.5437>>.

ZHANG, P.; QIN, G.; WANG, Y. Optimal maintenance decision method for urban gas pipelines based on as low as reasonably practicable principle. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su11010153>>.

ZHOU, Y. *et al.* Sequential imperfect preventive maintenance model with failure intensity reduction with an application to urban buses. **Reliability Engineering and System Safety**, [s. l.],

*l.*], v. 198, n. Nov. 2019, p. 106871, 2020. Disponível em:  
<<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106871>>.