

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica.

Paulo Allan Hamasaki

**OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO PLANEJADA DE
SISTEMAS CRÍTICOS SUJEITOS A RESTRIÇÕES DE
SEGURANÇA E OPERACIONAIS**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:

Prof. Dr. Guilherme Conceição Rocha

Orientador

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP - Brasil
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Hamasaki, Paulo Allan
Otimização da manutenção planejada de sistemas críticos sujeitos a restrições de segurança e operacionais / Paulo Allan Hamasaki.
São José dos Campos, 2025.
104f.

Dissertação de Mestrado – Curso de Ciências e Tecnologias Espaciais. Área de Gestão Tecnológica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientador: Prof. Dr. Guilherme Conceição Rocha.

1. Reatores nucleares. 2. Manutenção. 3. Arvore de falhas. 4. Otimização. 5. Sistemas de segurança. 6. Ciclo de vida. 7. Engenharia aeronáutica. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HAMASAKI, Paulo Allan. **Otimização da manutenção planejada de sistemas críticos sujeitos a restrições de segurança e operacionais**. 2025. 104f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Paulo Allan Hamasaki
TÍTULO DO TRABALHO: Otimização da manutenção planejada de sistemas críticos sujeitos a restrições de segurança e operacionais.
TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Paulo Allan Hamasaki
Avenida das Letras, 282
12.301-330 – Jacareí-SP

OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO PLANEJADA DE SISTEMAS CRÍTICOS SUJEITOS A RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA E OPERACIONAIS

Paulo Allan Hamasaki

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Angelo Passaro	Presidente	-	ITA
Prof. Dr. Guilherme Conceição Rocha	Orientador	-	ITA
Prof. Dr. Antonio Celio Pereira de Mesquita	Membro Interno	-	ITA
Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins	Membro Externo	-	USP

À minha família, por todo o suporte e apoio. A conclusão deste trabalho carrega mais do que apenas as minhas mãos.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à Força que rege todo o universo, que me concedeu as condições necessárias para iniciar e concluir os estudos nesta instituição de ensino ímpar.

Aos meus pais, Harrison Hamasaki e Sandra Partika, por me ensinarem, desde cedo, o valor dos estudos. À minha esposa, Anne Karoline Poli, e à minha filha, Helena, pelo apoio incondicional ao longo de toda esta jornada.

Ao Professor Guilherme Rocha, agradeço pela confiança e por ter aceitado o desafio de me orientar até a conclusão deste trabalho. Suas orientações, sempre pautadas por grande sabedoria, foram fundamentais para o êxito desta pesquisa.

Agradeço também a todos os professores das disciplinas cursadas ao longo da pós-graduação. A contribuição de cada um foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, expresso minha profunda gratidão à Marinha do Brasil pelo investimento e pela oportunidade de estudar no ITA. Como cidadão natural de São José dos Campos, realizar um curso nesta instituição representa um sentimento único. Espero honrar essa confiança e retribuir as expectativas com trabalho, comprometimento e dedicação nos desafios futuros da Marinha do Brasil.

*“The important thing is never to stop questioning.
Curiosity has its own reason for existing.”*

— ALBERT EINSTEIN

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para otimização do plano de manutenção de sistemas críticos sujeitos a requisitos de segurança e certificação, com aplicação ao sistema de resfriamento no cais de apoio a um reator nuclear embarcado. Embora instalado em terra, esse sistema integra a cadeia de segurança do reator sempre que o submarino está atracado, sendo, portanto, submetido às normas e diretrizes regulatórias do setor nuclear. A metodologia proposta concilia análise de segurança e restrições operacionais, com o objetivo de construir um calendário de manutenção que maximize a produtividade do sistema ao longo de seu ciclo de vida. A abordagem é estruturada em cinco etapas, a saber: a primeira corresponde à análise de segurança, com base na modelagem da árvore de falhas do sistema; a segunda, à etapa de otimização dos intervalos dos Certification Maintenance Requirements (CMR); a terceira, à análise de restrições operacionais; a quarta contempla a determinação de um calendário de manutenção preliminar; e, por fim, a quinta etapa é a consolidação do calendário de manutenção discretizado. A construção do plano de manutenção é executada por duas abordagens, uma utilizando programação inteira e outra por uma heurística desenvolvida neste estudo a fim de expandir as análises para horizontes temporais mais extensos. Os resultados obtidos demonstram que o método proposto é capaz de integrar diferentes domínios de análise para elaborar planos de manutenção otimizados, viáveis e consistentes com os requisitos normativos e operacionais impostos a sistemas críticos com exigência de confiabilidade.

Abstract

This work presents a methodology for optimizing the maintenance plan of critical systems subject to safety and certification requirements, with application to the cooling system at the support quay of an embarked nuclear reactor. Although installed on land, this system is part of the reactor's safety chain whenever the submarine is moored, and is therefore subject to the regulatory standards and guidelines of the nuclear sector. The proposed methodology combines safety analysis and operational constraints, with the objective of building a maintenance schedule that maximizes system productivity throughout its life cycle. The approach is structured in five stages, namely: the first corresponds to safety analysis, based on the modeling of the system's fault tree; the second, to the optimization stage of the Certification Maintenance Requirements (CMR) intervals; the third, to the analysis of operational constraints; the fourth involves the determination of a preliminary maintenance schedule; and finally, the fifth stage is the consolidation of the discretized maintenance schedule. The construction of the maintenance plan is carried out using two approaches: one based on integer programming, and another through a heuristic developed in this study to extend the analyses to longer time horizons. The results obtained demonstrate that the proposed method is capable of integrating different domains of analysis to develop optimized maintenance plans that are feasible and consistent with the normative and operational requirements imposed on critical systems with reliability demands.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Custo das fases do ciclo de vida de sistemas.	18
FIGURA 1.2 – Modelo 3D da central de utilidades, local onde se concentram os equipamentos do sistema de resfriamento e o início dos encaminhamentos de distribuição que correm ao longo das galerias.	20
FIGURA 1.3 – Terminal de distribuição de água de resfriamento, interface com o submarino nuclear atracado.	20
FIGURA 3.1 – Simbologia gráfica das portas lógicas “E” e “OU” utilizadas na árvore de falhas.	32
FIGURA 3.2 – Simbologia gráfica dos eventos básicos: evidentes e latentes	33
FIGURA 3.3 – Manutenções preventivas e corretivas.	37
FIGURA 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta	43
FIGURA 5.1 – Esquema do funcionamento das unidades de água de resfriamento	60
FIGURA 5.2 – Detalhamento do sistema de água de resfriamento	61
FIGURA 5.3 – Processo de construção da árvore de falha do sistema de resfriamento no cais.	64
FIGURA 5.4 – Árvore de falhas completa.	66
FIGURA 5.5 – Árvore de falhas equivalente.	67
FIGURA 5.6 – Fluxograma da Heurística	77
FIGURA 6.1 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Abordagem Exata (4 anos).	80
FIGURA 6.2 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Heurística (4 anos).	81
FIGURA 6.3 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Comparação.	82

FIGURA 6.4 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Heurística (30 anos). 83

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Classificação das Condições de Usina segundo a ANSI/ANS-51.1 . . .	34
TABELA 5.1 – Lista de componentes e taxas de falha	63
TABELA 5.2 – Equivalência de taxa de falhas em conjuntos de componentes	64
TABELA 5.3 – Equivalencia de taxa de falhas em conjuntos de componentes	65
TABELA 5.4 – Probabilidade dos eventos evidentes presentes nas figuras 5.4 e 5.5. .	67
TABELA 6.1 – Extrato do calendário de manutenção exportado pelo código com- putacional.	78
TABELA 6.2 – Intervalos CMR maximizados	79
TABELA 6.3 – Comparação de Resultados: Abordagem Exata vs. Heurística. . . .	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

AOR	<i>Annual Operating Time</i>
ANS	<i>American Nuclear Society</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BEA	<i>Bureau d'Enquêtes et d'Analyses</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCMR	<i>Candidate Certification Maintenance Requirement</i>
CMR	<i>Certification Maintenance Requirement</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DAU	<i>Defense Acquisition University</i>
DoD	<i>U. S. Department of Defense</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FMD	<i>Failure Mode/Mechanism Distributions</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
MDT	<i>Mean Downtime</i>
MILP	Programação Linear Inteira Mista
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTBM	<i>Mean Time Between Maintenances</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NPRD	<i>Non-Electronic Parts Reliability Data</i>
OREDA	<i>Offshore & Onshore Reliability Data</i>
PC	<i>Plant Condition</i>
REN	Rede Nacional de Transporte de Eletricidade
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SSA	<i>System Safety Analysis</i>
TAP	<i>Task Allocation Problem</i>

Lista de Símbolos

A_a	Disponibilidade alcançada
A_d	Variável binária de disponibilidade do sistema
A_i	Disponibilidade inerente
A_o	Disponibilidade operacional
AC	Corrente alternada
AEM	Falha do motor auxiliar
AP	Falha da bomba auxiliar
AS_x	Falha do circuito auxiliar
$AtvC_j$	Tarefas mandatórias do tipo CMR
$AtvR_m$	Tarefas preparatórias
$AtvS_k$	Tarefas de manutenção preventiva (<i>servicing</i>)
C	Custo total
CC_j	Custo das CMR
CD	Custo associado à indisponibilidade
CR_m	Custo das tarefas preparatórias
CS_k	Custo das tarefas <i>servicing</i>
C_x	Falha do circuito principal
D	Horizonte de planejamento (número de períodos)
EC_j	Intervalo entre manutenções CMR
E_i	Evento básico evidente
E_L	Evento básico latente
ES_k	Intervalo entre manutenções <i>servicing</i>
$F(t)$	Probabilidade do sistema falhar até o momento t
F_x	Falha do conjunto moto-hélice
FAN	Falha do ventilador
Fat	Faturamento total decorrente da disponibilidade do sistema
FD	Receita obtida pela disponibilidade em um período
Fr	Frequência de ocorrência anual
HE	Falha do trocador de calor
λ	Taxa de falha (f/h)

LC_j	Local de execução das CMR
LR_m	Local de execução das preparatórias
LS_k	Local de execução das <i>servicing</i>
M	Constante maior que o somatório de todas as atividades
M_d	Variável binária de indisponibilidade do sistema no período d
$P(A)$	Probabilidade de ocorrência do evento A
P_E	Probabilidade de ocorrência via porta lógica "E"
P_O	Probabilidade de ocorrência via porta lógica "OU"
PEM	Falha do motor principal
P_{max}	Probabilidade máxima admissível
PP	Falha da bomba principal
P_x	Falha do conjunto motobomba principal
\prod	Produtório
Q	Quantidade total de trabalhadores disponíveis
QC_j	Quantidade de trabalhadores requerida para a CMR j
QR_m	Quantidade de trabalhadores requerida para a preparatória m
QS_k	Quantidade de trabalhadores requerida para a <i>servicing</i> k
$R(t)$	Confiabilidade do sistema no tempo t
SS	Falha da subestação
\sum	Somatório
t	Tempo
VA	Falha de válvula auxiliar
VC	Falha de válvula de contorno
VEM	Falha do motor de ventilação
VR	Falha de válvula de retorno
VS	Falha de válvula de saída
X_{dk}	Variável binária de alocação de tarefa <i>servicing</i> k no período d
Y_{dj}	Variável binária de alocação de tarefa CMR j no período d
Z_{dm}	Variável binária de alocação de tarefa preparatória m no período d
\cap	Conector lógico de interseção
\cup	Conector lógico de união
\forall	Quantificador universal ("todo e qualquer")

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo	19
1.1.1	Objetivos específicos	20
1.2	Benefícios secundários	21
1.3	Definição de escopo e limitações da pesquisa	22
1.3.1	Premissas adotadas	23
1.4	Contribuições da Pesquisa	25
1.5	Estrutura da Dissertação	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Abordagem de Revisão da Literatura	27
2.2	Principais Estudos	27
2.3	Conclusão	29
3	REFERENCIAL TEÓRICO	31
3.1	Análise de segurança	31
3.2	Norma técnica	33
3.3	Confiabilidade	34
3.4	Manutenção e Manutenibilidade	36
3.5	Disponibilidade	38
3.6	Pesquisa Operacional	40
4	METODOLOGIA	42
4.1	Visão geral do método proposto	42

4.2	Metodologia de solução	43
4.2.1	Etapa 1: Análise de Segurança	43
4.2.2	Etapa 2: Maximização dos Intervalos entre as CCMR	44
4.2.3	Etapa 3: Análise das Restrições Operacionais	44
4.2.4	Etapa 4: Elaboração do Calendário de Manutenção Preliminar	44
4.2.5	Etapa 5: Consolidação do Calendário de Manutenção Discretizado	45
4.3	Modelo de Otimização	45
4.3.1	Parâmetros	45
4.3.2	Variáveis	49
4.3.3	Função objetivo	50
4.3.4	Restrições	52
5	DESENVOLVIMENTO	57
5.1	Estudo de Caso	57
5.1.1	Sistema de resfriamento no cais	59
5.1.2	Descrição do sistema	60
5.2	Análise de segurança	61
5.3	Implementação Computacional	68
5.3.1	Implementação da Etapa 2 - Otimização dos intervalos CMR	68
5.3.2	Implementação da Etapa 3 - Análise das Restrições Operacionais	70
5.3.3	Implementação da Etapa 4 - Elaboração do Calendário de Manutenção Preliminar	72
5.3.4	Implementação da Etapa 5 - Consolidação do Calendário de Manutenção Discretizado	73
5.4	Heurística para Planejamento de Manutenção	74
6	RESULTADOS	78
6.1	Otimização dos intervalos CMR	79
6.2	Otimização dos planos de manutenção	79
6.2.1	Solução Exata	80
6.2.2	Solução da Heurística	81

6.2.3	Comparação Entre as Abordagens	81
6.3	Extrapolação para 30 anos de planejamento	83
7	ANÁLISE CRÍTICA	85
7.1	Análise Crítica da Otimização de Intervalos CMR	85
7.2	Análise Crítica dos Calendários de Manutenção	86
7.2.1	Solução Exata (4 anos)	86
7.2.2	Solução Heurística (4 anos)	86
7.2.3	Solução Heurística (30 anos)	86
7.3	Conclusão da Análise Crítica	87
8	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	88
8.1	Conclusões Principais	88
8.2	Contribuições do Estudo	88
8.2.1	Contribuição Acadêmica	88
8.2.2	Contribuições Práticas	89
8.3	Limitações da Pesquisa	89
8.4	Trabalhos Futuros	90
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO DOS INTERVALOS CMR	95
	APÊNDICE B – ALGORITMO DA PROGRAMAÇÃO INTEIRA PARA ELABORAÇÃO DE CALENDÁRIO DE MANUTENÇÃO	96
	APÊNDICE C – ALGORITMO DA HEURÍSTICA DE ELABORAÇÃO DE CALENDÁRIO DE MANUTENÇÃO	98

1 Introdução

Sistemas críticos, como sistemas aeronáuticos, aeroespaciais e nucleares, operam sob normas de segurança e são submetidos a processos de certificação. Para garantir sua operação segura e confiável ao longo de todo o ciclo de vida, esses sistemas devem apresentar planos de manutenção bem estruturados, capazes de mitigar falhas latentes e preservar a integridade funcional dos equipamentos. Tais planos precisam ser compatíveis com requisitos normativos, critérios de confiabilidade e restrições operacionais, o que torna sua elaboração um desafio técnico de alta complexidade (MOUBRAY, 2001).

Destaca-se que, conforme ilustrado na figura 1.1, a fase de operação e suporte corresponde a aproximadamente 55% a 69% do custo total do ciclo de vida dos sistemas (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY (United States), 2023). Essa fase abrange tanto as despesas de operação quanto as atividades de manutenção. Nesse contexto, a adoção de métodos voltados à otimização ou simplificação da manutenção e do suporte pode gerar ganhos expressivos de eficiência e competitividade, tanto em sistemas de uso comercial quanto em aplicações de caráter militar.

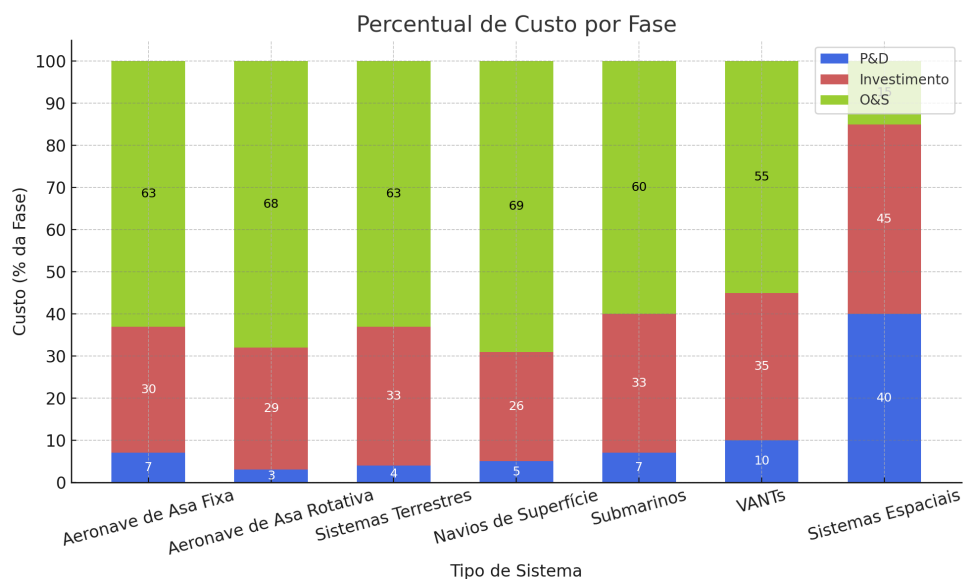


FIGURA 1.1 – Custo das fases do ciclo de vida de sistemas.

Fonte: Adaptado de DAU (2023).

No contexto brasileiro, os custos de operação e manutenção das usinas nucleares representam parcela significativa do orçamento setorial. Em 2024, os gastos de manutenção e operação das unidades Angra 1 e Angra 2 foram estimados em aproximadamente R\$ 800 milhões (PETRONOTÍCIAS, 2025). Esses números evidenciam a magnitude dos investimentos necessários para assegurar a confiabilidade e a continuidade operacional de sistemas que exigem programas de manutenção especializados e regulados.

No contexto acadêmico, conforme será apresentado no Capítulo 2, os estudos sobre otimização ou simplificação da manutenção voltados à certificação ainda são escassos. Há avanços no setor aeronáutico, mas a literatura disponível não apresenta trabalhos que proponham metodologias integradas que conciliem, simultaneamente, análise de segurança, conformidade normativa e restrições operacionais e, em especial, em ambientes regulados como o setor nuclear.

É nesse cenário que se insere o presente estudo. Motivado pelo potencial observado a partir da literatura revisada, este estudo propõe um método para a elaboração de planos de manutenção que satisfaçam exigências regulatórias, mas que também explorem, de forma sistemática, oportunidades de otimização associadas à alocação de recursos, ao empacotamento de tarefas, à redução de custos, à redução de intervenções e à maximização da disponibilidade dos sistemas.

O contexto de aplicação escolhido no desenvolvimento é o da Marinha do Brasil, mais especificamente o sistema de resfriamento do cais de apoio a submarinos de propulsão nuclear, atualmente em fase de desenvolvimento. Este sistema será instalado em terra e será responsável por integrar a cadeia de segurança do reator sempre que o submarino estiver atracado, garantindo a remoção contínua de calor residual. Ele é composto pela central de utilidades, onde se concentram bombas, trocadores de calor e sistemas auxiliares; pelas galerias de encaminhamento, que abrigam as linhas de distribuição de água de resfriamento; e pelo terminal de interface com o submarino, que assegura a conexão segura entre a infraestrutura terrestre e o sistema de bordo. A figura 1.2 apresenta o modelo tridimensional da central de utilidades, enquanto a figura 1.3 ilustra o terminal de distribuição. A criticidade do sistema é associada à necessidade de conformidade com normas do setor nuclear, tornando essencial a definição de um plano de manutenção, de modo a garantir disponibilidade adequada e aderência regulatória ao longo de sua vida útil.

1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo é desenvolver uma metodologia para a elaboração do planejamento de manutenção otimizado para sistemas tecnológicos sujeitos a restrições de

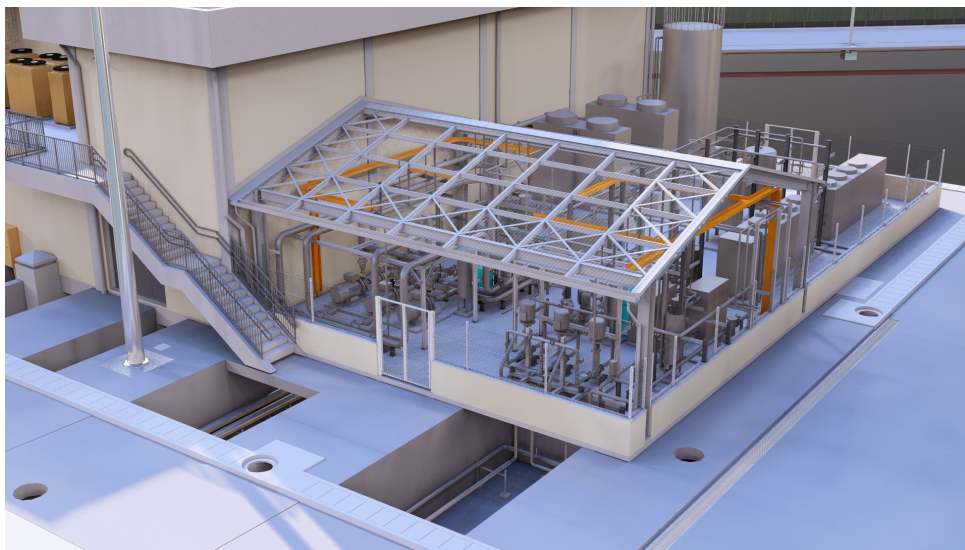


FIGURA 1.2 – Modelo 3D da central de utilidades, local onde se concentram os equipamentos do sistema de resfriamento e o início dos encaminhamentos de distribuição que correm ao longo das galerias.

Fonte: Autor (2025).

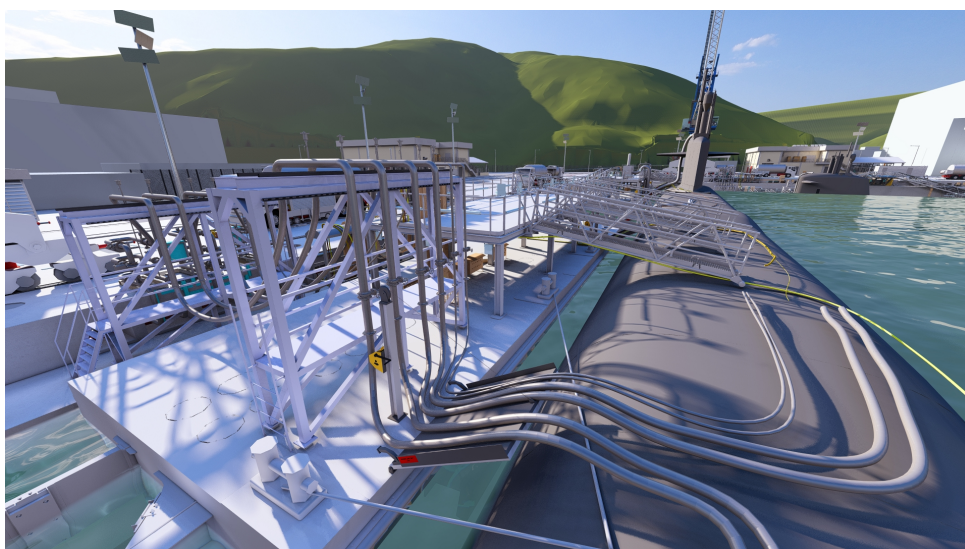


FIGURA 1.3 – Terminal de distribuição de água de resfriamento, interface com o submarino nuclear atracado.

Fonte: Autor (2025).

segurança e operacionais, buscando maximizar a disponibilidade operacional do sistema.

1.1.1 Objetivos específicos

Este trabalho aborda o sistema desde sua arquitetura, incluindo uma análise de segurança, até a construção de um calendário de manutenção considerando restrições que aproximam o modelo das condições reais de operação. Para atingir o objetivo principal, é necessário estabelecer e alcançar diversos objetivos específicos que geram benefícios

secundários.

- Realizar a análise de segurança do sistema e avaliar a topologia da árvore de falha, garantindo a correta atribuição de portas lógicas, conforme SAE (1996) e Rocha (2023).
- Identificar os componentes críticos sujeitos a falhas latentes e definir as atividades de manutenção necessárias para atender aos requisitos de certificação e segurança.
- Estabelecer os limites de intervalo entre as atividades de manutenção, respeitando as restrições de segurança das normas aplicáveis e maximizando os períodos permitidos entre intervenções.
- Desenvolver um calendário de manutenção discretizado diariamente ao longo de todo o ciclo de vida do sistema.
- Incorporar um processo de otimização para alocação e empacotamento das atividades de manutenção, respeitando os limites de recursos disponíveis, ou seja, restrições operacionais.
- Garantir a compatibilidade entre o plano de manutenção e a agenda operativa, minimizando impactos da indisponibilidade do sistema.
- Maximizar a sinergia entre tarefas preparatórias, otimizando a utilização de recursos e reduzindo redundâncias nos processos de manutenção.
- Minimizar a ociosidade da mão de obra em períodos com atividades de manutenção alocadas.

1.2 Benefícios secundários

Os objetivos específicos contribuem para a identificação de benefícios marginais que não sejam especificamente a maximização da disponibilidade do sistema de interesse.

- **Redução de custos operacionais:** A otimização dos intervalos de manutenção e o melhor aproveitamento da mão de obra reduzem os custos diretos e indiretos associados à manutenção do sistema ao longo do seu ciclo de vida.
- **Maior eficiência na alocação de recursos:** A consideração das restrições operacionais e logísticas evita gargalos na execução das atividades de manutenção.

- **Aprimoramento da segurança operacional:** A definição estruturada das atividades de manutenção e a garantia do cumprimento dos requisitos normativos reduzem a probabilidade de falhas latentes que poderiam comprometer a integridade do sistema.
- **Sinergia entre atividades de manutenção:** O compartilhamento de tarefas preparatórias reduz redundâncias e torna os períodos de manutenção mais produtivos.
- **Apoio à certificação e conformidade regulatória:** O modelo estruturado auxilia na demonstração de conformidade com as normas aplicáveis, facilitando o processo de certificação.
- **Previsibilidade e planejamento aprimorados:** A implementação de um calendário de manutenção estruturado permite uma melhor previsibilidade das intervenções.
- **Redução de intervenções desnecessárias e impacto da experiência do operador:** A minimização de tarefas de manutenção reduz o número de desmontagens e remontagens do sistema, o que é relevante, pois, nem sempre, os operadores possuem ampla experiência. Isso mitiga erros operacionais, evita desgastes prematuros e melhora a confiabilidade geral do sistema.
- **Contribuição para futuras aplicações:** A metodologia desenvolvida pode ser adaptada para outros sistemas tecnológicos com requisitos de segurança, ampliando seu escopo de aplicação em diferentes domínios.

1.3 Definição de escopo e limitações da pesquisa

A elaboração do planejamento de manutenção de sistemas é uma atividade complexa que envolve diversas variáveis ao longo de um horizonte de planejamento que pode se estender por décadas. O método proposto neste estudo busca conciliar diversas condições, mas, por mais completa que uma abordagem possa ser, não se espera esgotar todas as possíveis combinações. Segundo Box e Draper (1987), "todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis". Com a definição do escopo, busca-se estabelecer o nível de referência para as condições externas ao planejamento, fazendo com que o modelo não deixe de ser uma abstração útil que permita a análise, a otimização e a proposição de soluções aplicáveis ao problema.

A metodologia proposta baseia-se em informações como a arquitetura do sistema e as taxas de falha dos componentes para realizar a análise de segurança. Os requisitos de segurança são definidos conforme as regulamentações aplicáveis, sendo utilizados para restringir e otimizar os intervalos entre as manutenções relacionadas. Os intervalos máximos

permitidos são incluídos no modelo como restrições para determinar a disposição ideal das tarefas. A alocação de mão de obra é modelada considerando restrições de disponibilidade e o número máximo de trabalhadores simultâneos em um mesmo espaço, permitindo adequar o paralelismo das atividades às limitações estruturais e operacionais.

O modelo também incorpora tarefas preparatórias, fundamentais para viabilizar a execução das intervenções planejadas. A abordagem adotada permite o aproveitamento dessas tarefas, de modo que uma mesma preparação possa atender a múltiplas manutenções principais, reduzindo a duplicação de esforços e o uso de recursos. Esse aspecto também é considerado no sequenciamento lógico das atividades.

O calendário operacional do submarino determina períodos nos quais manutenções não podem ser realizadas, pois a embarcação estará atracada. Custos e impactos financeiros relacionados às atividades de manutenção são determinados de forma hipotética, viabilizando a formulação da função objetivo para a construção do calendário. A discretização diária do planejamento contribui para a organização eficiente da sequência de tarefas, garantindo maior previsibilidade e facilitando sua execução.

As premissas adotadas são essenciais para garantir que o modelo seja aplicável e que as soluções geradas sejam representativas, mesmo diante de algumas aproximações. As hipóteses também orientam a interpretação dos resultados, considerando as limitações inerentes às simplificações adotadas.

1.3.1 Premissas adotadas

1. **Calendário:** não há distinção entre dias úteis, finais de semana e feriados; todos os dias são tratados igualmente para a alocação das atividades.
2. **Condições climáticas:** não são consideradas condições climáticas adversas que possam impedir a execução dos serviços em qualquer período do calendário.
3. **Custo das atividades:** os custos associados às atividades de manutenção são considerados pacotes fixos, sem variações ao longo do tempo. Além disso, os valores utilizados são hipotéticos, porém são essenciais para a modelagem da função objetivo da otimização.
4. **Disponibilidade da equipe:** as férias dos trabalhadores devem ser planejadas após a elaboração do calendário, portanto, não afetam a alocação de atividades. Também não são consideradas faltas ou restrições de serviço dos trabalhadores.
5. **Disponibilidade de trabalhadores:** a quantidade de trabalhadores disponíveis é constante ao longo do tempo e hipotética.

6. **Duração das atividades:** todas as atividades de manutenção podem ser concluídas dentro de um único período de trabalho, no caso um dia. O único componente que apresenta um MTTR superior a 24h, segundo a OREDA (2015), é a bomba centrífuga, porém a premissa continua válida, pois o banco de dados considera todos os tipos de manutenção, inclusive as corretivas, enquanto o calendário contempla apenas manutenções preventivas.
7. **Fatores externos:** o modelo não considera impactos de eventos sociais, políticos ou econômicos que possam interromper a execução dos serviços.
8. **Independência limitada entre as atividades:** as atividades podem ser realizadas sem restrições de sequência lógica, com exceção das tarefas preparatórias, que devem ser concluídas antes das atividades principais associadas ao mesmo local.
9. **Instrumentação e controle:** não foram analisadas falhas ou manutenções relacionadas a sistemas de instrumentação e controle dos componentes.
10. **Homogeneidade dos recursos:** todos os recursos humanos e materiais utilizados nas atividades de manutenção possuem características e capacidades uniformes ao longo do ciclo de vida do sistema.
11. **Preparações:** as atividades preparatórias estabelecem o sequenciamento lógico com as atividades principais. Elas podem incluir diversas ações, como a mobilização de maquinário, o isolamento de área e a remoção de interferências. Na hipótese considerada neste estudo, será adotada apenas uma atividade preparatória por local, mantendo a mesma alocação de trabalhadores, o mesmo tempo de execução e capacidade genérica para toda e qualquer preparação.
12. **Qualificação dos trabalhadores:** todos os trabalhadores possuem capacitação para realizar qualquer uma das tarefas de manutenção previstas neste estudo.
13. **Regime de operação dos componentes:** todos os componentes do sistema operam sob regime contínuo e homogêneo de exposição, com tempo anual de operação constante e equivalente.
14. **Simplificação da probabilidade de falha:** é utilizada a aproximação linear da função exponencial $P = e^{-\lambda t}$, considerando $P \approx \lambda \cdot t$. Essa premissa é válida ao verificar que as taxas de falha são da ordem de 10^{-5} a 10^{-6} por hora, tornando-os eventos raros.
15. **Simplificação da FTA:** decorrente das falhas de componentes serem tratados como eventos raros, a expressão matemática da "OU" terão os termos de ordens superiores desprezados.

16. **Taxa de falhas constante:** assume-se que todos os componentes do sistema estão na fase de maturidade e apresentam falhas puramente aleatórias (PHAM, 2003).

1.4 Contribuições da Pesquisa

A principal contribuição deste estudo é a proposição de um método abrangente para a otimização de calendários de manutenção em sistemas críticos sujeitos a restrições de segurança e operacionais. Embora a aplicação neste estudo seja num Sistema de Propulsão Nuclear, a diferença reside nas normas aplicáveis, tornando o método desenvolvido aplicável a diversos setores, como os industriais, aeronáuticos, espaciais, militares e navais. O estudo combina análise de segurança, programação matemática exata e heurística para elaborar calendários de manutenção otimizados, considerando os intervalos de manutenção com restrições operacionais, como alocação de mão de obra, limitações espaciais e conformidade com requisitos normativos de segurança.

Diferentemente dos estudos elencados no Capítulo 2, este método integra fatores operacionais ao planejamento das CCMR, resultando em um modelo aplicável ao dia a dia das atividades de manutenção.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em quatro capítulos, além desta introdução, cada um com conteúdo específico para o desenvolvimento do estudo. A seguir, apresenta-se uma breve descrição do conteúdo abordado em cada capítulo:

- **Revisão bibliográfica:** Apresenta o estado da arte sobre otimização de planos de manutenção e associação com as certificações, discutindo as lacunas identificadas nos estudos acadêmicos e evidenciando a necessidade da proposta desenvolvida nesta dissertação.
- **Referencial teórico:** Reúne os principais conceitos que fundamentam a pesquisa, abrangendo os seguintes temas: análise de segurança de sistemas, confiabilidade, manutenção preventiva e de segurança, disponibilidade e fundamentos de métodos de otimização, exatos e heurísticos.
- **Metodologia:** Detalha a metodologia proposta, composta por cinco etapas: i) análise de segurança (incluindo a modelagem por árvore de falhas); ii) otimização dos intervalos CMR; iii) análise das restrições operacionais; iv) elaboração do calendário de manutenção preliminar; e v) consolidação do calendário de manutenção

discretizado. Também são apresentados o fluxograma geral do método e o modelo matemático da otimização.

- **Desenvolvimento:** Apresenta a aplicação prática da metodologia no sistema de resfriamento do cais e os métodos de otimização aplicados ao problema.
- **Resultados:** Apresenta os resultados obtidos pelas duas abordagens, com uma análise comparativa de desempenho, os gráficos de distribuição das atividades de manutenção e a extrapolação para o ciclo de vida do sistema.
- **Análise Crítica:** Realiza a avaliação crítica das soluções geradas, discutindo a qualidade do empacotamento das atividades, o aproveitamento da mão de obra, a escalabilidade da heurística e as limitações observadas ao longo do ciclo de vida do sistema.
- **Conclusão e Trabalhos Futuros:** Sintetiza as principais conclusões do estudo, destaca as contribuições acadêmicas e práticas da metodologia desenvolvida e propõe sugestões para trabalhos futuros, como a expansão do modelo para múltiplos sistemas de apoio e novas etapas de refinamento da solução heurística.

2 Revisão Bibliográfica

A revisão da literatura visa identificar e analisar os trabalhos relevantes que abordam modelos de otimização de planos de manutenção e metodologias aplicadas em sistemas com requisitos de segurança, além de apresentar a relevância deste estudo para o desenvolvimento científico.

2.1 Abordagem de Revisão da Literatura

Antes de iniciar a busca por estudos e trabalhos relacionados ao tema desta dissertação, foi necessário definir claramente o escopo da pesquisa e as palavras-chave associadas. Foram selecionados trabalhos que abordam processos de otimização de planejamento de manutenção, dando preferência a estudos que envolvem sistemas com requisitos de segurança normativos. As palavras-chave utilizadas foram: *maintenance plan*, *optimization*, *certification requirements*, *CMR*, *CCMR*, *safety analysis* e *safety requirements*.

As buscas foram realizadas no Portal de Periódicos da CAPES e no *Google Scholar*, combinando diferentes palavras-chave e operadores lógicos para abranger uma ampla gama de publicações. A seleção dos trabalhos analisados foi feita por meio da avaliação dos títulos e resumos, priorizando aqueles com aplicação relevante ao contexto desta pesquisa.

2.2 Principais Estudos

Estes são os principais estudos e mais relevantes trabalhos do meio acadêmico relacionados ao tema deste estudo.

Deschamps e Cattel (2014) apresenta um modelo matemático para otimização de intervalos de manutenção em sistemas críticos. A abordagem utiliza restrições baseadas no regulamento *FAA Advisory Circular 25.1309*, aplicável à aviação comercial, conceitualmente análoga à norma ANSI/ANS-51.1, utilizada para certificação de segurança nuclear (UNITED STATES. Department of Transportation. Federal Aviation Administration, 1988; AMERI-

CAN NUCLEAR SOCIETY, 1983).

Mata Filho e Abrahão (2019) propõem um modelo baseado em meta-heurísticas para definir os intervalos de manutenção de sistemas, minimizando custos sem comprometer a segurança. O estudo considera um sistema de energia com componentes redundantes e realiza uma análise para balancear custos de manutenção corretiva e preventiva.

Bingbing *et al.* (2014) aprofundam na definição e na análise de requisitos, detalhando a importância da certificação de manutenção, juntamente com as análises de segurança e dos processos de certificação. Embora o estudo não proponha uma otimização direta, ele fornece um arcabouço abrangente para entender os desafios na certificação de sistemas críticos.

Tao (2022) discute a importância da simplificação dos CCMR durante a fase de projeto, destacando que a redução no número de tarefas pode melhorar a segurança operacional. O estudo demonstra que, ao considerar a probabilidade média de falha e a sequência de falhas, os intervalos podem ser expandidos sem comprometer a conformidade regulatória.

Barbosa *et al.* (2023) e Barbosa (2024) propõe um método escalável para reduzir custos de manutenção associados aos CCMR, mantendo a conformidade com as normas de segurança. O modelo segue as diretrizes da *FAA Advisory Circular 25.1309*, e incorpora também as restrições oriundas do *Specific Risk*, reforçando o foco em eventos de falha com impacto direto na segurança. O estudo explora a viabilidade de inspeções para reduzir a latência do sistema e emprega heurísticas para maximizar os intervalos de manutenção, minimizando a repetição de tarefas ao longo do ciclo de vida do sistema.

No contexto do empacotamento de tarefas de manutenção, Deng *et al.* (2023) propõem um modelo de apoio à decisão que integra o planejamento do pacote de manutenção a múltiplas restrições práticas, como janela temporal, limitação de recursos e lógica de precedência entre tarefas. O modelo é resolvido com técnicas de programação matemática e heurísticas, permitindo maior eficiência e viabilidade operacional.

De forma complementar, Si *et al.* (2023) apresentam um método de combinação de tarefas preventivas de manutenção baseado na análise de custos generalizados (custo direto, custo de perda e tempo de manutenção). O modelo considera a lógica de precedência, carga de trabalho e preferências dos operadores, buscando formar pacotes de manutenção otimizados dentro de intervalos executáveis viáveis, com menor risco de inviabilidade prática.

Mata Filho (2024) também desenvolveu uma metodologia abrangente para alocação e empacotamento de tarefas de manutenção (TAP). A abordagem considera restrições operacionais, como limites de voo dos componentes, probabilidade de falhas, custo de oportunidade decorrente da indisponibilidade do sistema e sequenciamento lógico de tarefas. Este modelo propõe uma estratégia de agrupamento inteligente de tarefas para

maximizar a disponibilidade e reduzir os custos operacionais e é relevante para a elaboração do processo de otimização do presente estudo.

Dentre os resultados das buscas, destaca-se três que relacionam otimização de plano de manutenção e sistemas nucleares: O primeiro é Billinton e El-Sheikhi (1983) que desenvolveram um modelo para otimização do cronograma de manutenção em usinas nucleares, utilizando um critério de risco quantitativo do atendimento à demanda para balancear a disponibilidade da geração de energia e o nível de confiabilidade ao longo do ano. O estudo introduziu a técnica de nivelamento de risco, que busca minimizar a variação na disponibilidade da potência gerada.

O segundo foi Yada *et al.* (2023) que propõe um esquema de otimização de manutenção para reatores refrigerados a sódio. O método utiliza informações de risco e degradação para ajustar planos de inspeção, garantindo os níveis de confiabilidade.

O terceiro é o estudo ARKADIA, desenvolvido por Uchibori *et al.* (2023) que apresenta um método baseado em inteligência artificial e simulação para otimizar o ciclo de vida de reatores nucleares. Embora não tenha foco exclusivo em manutenção, o modelo inclui o planejamento de manutenção no ciclo de vida do reator e também realiza análise de segurança, porém não se associa às atividades de manutenção.

2.3 Conclusão

Os estudos revisados demonstram que a otimização dos processos de certificação de manutenção ainda constitui um campo de pesquisa pouco explorado. Persistem oportunidades de avanço, sobretudo na integração e otimização dos seguintes aspectos: (i) análise de segurança; (ii) otimização e simplificação das atividades relacionadas à certificação; e (iii) planejamento de manutenção. Observa-se, ainda, uma escassez de trabalhos que abordem a relação entre planos de manutenção e sistemas nucleares, o que evidencia uma lacuna relevante na literatura.

A metodologia deste trabalho se distingue por:

- integrar análise de segurança e otimização de manutenção, com múltiplas restrições operacionais, de forma simultânea;
- aplicar a metodologia desenvolvida num sistema nuclear;
- utilizar bases normativas do setor nuclear;
- flexibilizar planejamento por conta do nível de discretização; e
- maximizar disponibilidade de sistemas com requisitos de certificação.

Quadro 2.1 – Resumo da literatura: objetivos, métodos e características abordadas

Estudos	Min. Custo	Max. Disponibilidade	Restrições de Segurança	Otimização CMR	Restrições Operacionais	Nuclear
Deschamps et al. (2014)	■	◻	■	■	◻	◻
Mata Filho et al. (2019)	■	◻	◻	◻	◻	◻
Bingbing et al. (2014)	◻	◻	■	■	◻	◻
Tao et al. (2022)	■	◻	■	■	◻	◻
Barbosa et al. (2023, 2024)	■	◻	■	■	◻	◻
Deng et al. (2023)	■	■	◻	◻	■	◻
Si et al. (2023)	■	■	◻	◻	■	◻
Mata Filho (2024)	■	■	◻	◻	■	◻
Billinton et al. (1983)	◻	■	■	◻	◻	■
Yada et al. (2023)	◻	■	■	◻	◻	■
Uchibori et al. (2023)	■	■	■	◻	◻	■
Este estudo	■	■	■	■	■	■

Legenda: ■ = Atendido; ◻ = Parcialmente atendido; e ◻ = Não atendido.

3 Referencial Teórico

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para o entendimento do método proposto nesta dissertação. O conteúdo aqui exposto se restringe aos conhecimentos efetivamente aplicados no desenvolvimento deste estudo. Serão abordadas as bases conceituais da análise de segurança, norma técnica do setor nuclear, confiabilidade, manutenção e manutenibilidade, disponibilidade e fundamentos de pesquisa operacional, com ênfase na aplicação prática de cada conceito dentro do escopo do sistema analisado.

3.1 Análise de segurança

A análise de segurança é essencial em sistemas tecnológicos que possuem impacto direto sobre pessoas, meio ambiente ou outros sistemas críticos. Seu principal objetivo é identificar eventos que podem comprometer a integridade do sistema e propor ações preventivas para mitigar riscos inaceitáveis (ERICSON *et al.*, 2015).

Neste trabalho, foi utilizada a Análise de Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis* – FTA) para modelar a falha do sistema de resfriamento no cais de apoio ao reator nuclear embarcado. A FTA permite decompor logicamente o evento topo (falha indesejada) em suas causas básicas, evidentes ou latentes, facilitando a identificação de pontos críticos para manutenção e certificação (REASON, 1990).

A estrutura da FTA é construída de forma hierárquica e conduzida com abordagem *top-down*, utilizando portas lógicas para conectar os eventos:

- A porta lógica “E” é ativada quando todos os eventos imediatamente inferiores ocorrerem simultaneamente. Neste trabalho, assume-se que os eventos são independentes, de modo que a probabilidade de ocorrência P_E do evento superior é dada por:

$$P_E = P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (3.1)$$

- A porta lógica “OU” é ativada se pelo menos um dos eventos subordinados ocorrer. Sob a mesma hipótese de independência entre os eventos, a probabilidade P_O é:

$$P_O = P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) \quad (3.2)$$



FIGURA 3.1 – Simbologia gráfica das portas lógicas “E” e “OU” utilizadas na árvore de falhas.

Fonte: Autor (2025).

Para simplificar a modelagem e facilitar a análise da árvore completa, assume-se a hipótese de que os eventos básicos são estatisticamente independentes e raros (isto é, $P \ll 1$). Sob essa condição, o termo de ordem superior $P(A) \cdot P(B)$ é desprezível na expressão da porta “OU”, resultando em:

$$P_O = P(A \cup B) \approx P(A) + P(B) \quad (3.3)$$

Essa aproximação permite somar as probabilidades dos cortes mínimos que compõem a árvore para estimar a probabilidade do evento topo de forma conservadora. Essa abordagem foi fundamental para validar, conforme a ANSI/ANS-51.1, que os eventos associados ao sistema de resfriamento não ultrapassassem os limites de probabilidade de eventos definidos pelas condições de usina apropriadas.

Na modelagem da árvore de falhas, os eventos básicos são classificados em dois tipos:

- **Eventos Evidentes:** falhas que, uma vez ocorridas, são imediatamente perceptíveis durante a operação normal do sistema. Um exemplo aplicado ao sistema de resfriamento no cais seria a falha da bomba principal de circulação, detectada pela queda imediata da vazão de água de resfriamento.
- **Eventos Latentes:** falhas que permanecem ocultas até que o componente ou sistema afetado seja acionado ou testado. No contexto deste trabalho, um exemplo seria a falha de válvula de isolamento, que somente seria percebida no momento em que a válvula fosse acionada e não realizasse o fechamento adequado.

Para representar graficamente essa diferenciação na FTA, utilizam-se símbolos distintos, conforme mostrado na figura 3.2:

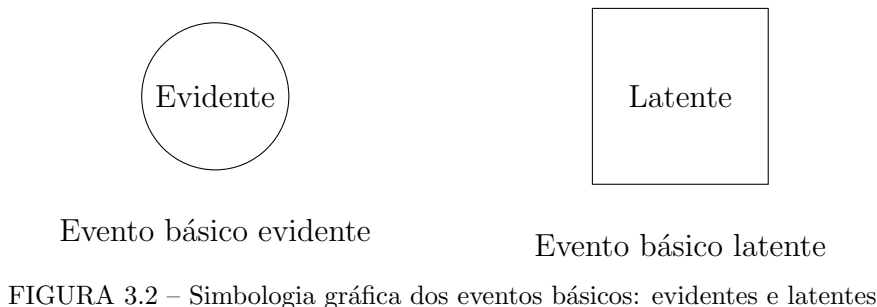


FIGURA 3.2 – Simbologia gráfica dos eventos básicos: evidentes e latentes

Fonte: Autor (2025).

Essa distinção é essencial no contexto da análise de segurança, pois eventos latentes exigem a implementação de atividades de manutenção mandatória (CMR) específicas para garantir que o sistema preserve sua função de segurança ao longo do tempo.

Na dissertação, a estrutura de árvore de falhas foi aplicada para justificar tecnicamente os intervalos mandatórios de manutenção (CMR), possibilitando a formulação do problema de otimização dos intervalos com base em falhas latentes e suas taxas de ocorrência.

3.2 Norma técnica

A norma técnica utilizada como referência normativa no desenvolvimento deste trabalho é a ANSI/ANS-51.1 – *Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants*, publicada pela *American Nuclear Society*. Voltada ao projeto de usinas com reatores pressurizados estacionários, sua estrutura de classificação de eventos e diretrizes para confiabilidade mínima aplicam-se ao sistema de resfriamento no cais, uma vez que este integra a cadeia de segurança do reator sempre que o submarino está atracado.

A norma define que os sistemas associados à segurança nuclear devem ser avaliados quanto à sua capacidade de manter condições seguras de operação mesmo em caso de falhas simples, falhas comuns e eventos externos. Para isso, classifica os eventos iniciadores de falhas em cinco categorias de condições de usina (*Plant Conditions - PC*), com base em sua frequência de ocorrência anual estimada, conforme ilustrado na tabela 3.1:

TABELA 3.1 – Classificação das Condições de Usina segundo a ANSI/ANS-51.1

Condição de Usina	Frequência de Ocorrência F	Classificação Qualitativa
PC-1	Evento esperado	Operação normal
PC-2	$F \geq 10^{-1}$	Evento operacional com resposta planejada
PC-3	$10^{-1} > F \geq 10^{-2}$	Evento com impacto leve controlável
PC-4	$10^{-2} > F \geq 10^{-4}$	Evento acidental moderado
PC-5	$10^{-4} > F \geq 10^{-6}$	Evento acidental severo de baixa frequência

A norma estabelece que eventos com frequência inferior a 10^{-2} por ano devem ser tratados no projeto, por meio de redundâncias, detecção de falhas, e planejamento de manutenções mandatórias. Neste contexto, as atividades CMR são justificadas como barreiras para reduzir a probabilidade de falhas latentes que possam resultar em falhas catastróficas.

Outro ponto importante da norma é a hipótese de falha simples: um sistema deve ser capaz de manter sua função de segurança mesmo com a falha de um único componente. Para isso, impõe-se o uso de redundância física e lógica de componentes a fim de evitar a falha do sistema decorrente de uma única falha.

A aplicação da norma ANSI/ANS-51.1 nesta dissertação ocorre na validação da árvore de falhas, na aplicação das portas lógicas e na categorização dos eventos de falha associados ao sistema de resfriamento, assim como na determinação dos limites de probabilidade máxima para falhas do sistema. Desta forma, a norma atua como restrição de segurança para a formulação do modelo de otimização dos intervalos CMR, garantindo conformidade com os critérios de confiabilidade.

3.3 Confiabilidade

A confiabilidade é um dos pilares da engenharia de manutenção aplicada a sistemas críticos, especialmente quando associada a requisitos de segurança. Segundo Blanchard (2004), “confiabilidade é a probabilidade de que um item desempenhe a sua função pretendida por um intervalo de tempo especificado, sob condições estabelecidas.” Neste trabalho, o conceito é fundamental para justificar os intervalos de manutenção das atividades mandatórias (CMR), uma vez que a falha de componentes latentes pode comprometer a função de segurança do sistema.

Se T denota a variável aleatória "tempo até a falha", a função de confiabilidade é definida por:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t), \quad (3.4)$$

em que $F(t) = P(T \leq t)$ é a probabilidade do sistema falhar até o tempo T . Equivalentemente, usando a densidade $f(t) = d\frac{F(t)}{dt}$:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (3.5)$$

Assumindo que o tempo até a falha segue uma distribuição exponencial, com vida média igual a θ , a densidade é:

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta}, \quad t \geq 0. \quad (3.6)$$

Substituindo a equação 3.6 na equação (3.5), obtém-se a função de confiabilidade:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\theta} e^{-u/\theta} du = e^{-t/\theta}. \quad (3.7)$$

Define-se ainda a **taxa de falha instantânea** (função risco) por

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (3.8)$$

No caso exponencial, $h(t)$ é constante:

$$h(t) \equiv \lambda = \frac{1}{\theta}. \quad (3.9)$$

Neste estudo, especialmente por se tratar de taxas de falha de ordem de 10^{-5} e 10^{-6} ($\lambda \ll 1$), pode-se adotar a linearização da função de probabilidade de falha por meio de uma aproximação do primeiro termo da expansão de Taylor da exponencial. Assim, tem-se:

$$F(t) \approx \lambda \cdot t \quad (3.10)$$

Essa premissa de linearização da probabilidade de falha foi adotada nesta dissertação com o objetivo de simplificar o modelo matemático de otimização dos intervalos de manutenção. Dessa forma, a função objetivo pôde ser expressa como diretamente proporcional ao tempo entre manutenções e à taxa de falha.

Confiabilidade de Sistemas com Múltiplos Componentes

Em muitos casos, um sistema é composto por mais de um componente, e o comportamento do sistema dependerá da forma como esses componentes estão organizados, em série, paralelo ou arranjos mistos. A seguir, apresentam-se as expressões clássicas para esses dois casos:

Sistema em série: o sistema falha se qualquer um dos componentes falhar. A confiabilidade total é o produto das confiabilidades individuais:

$$R_{srie}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.11)$$

Sistema em paralelo: o sistema continua operando enquanto ao menos um dos componentes estiver funcionando. A confiabilidade total é dada por:

$$R_{paralelo}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (3.12)$$

No desenvolvimento deste trabalho, a confiabilidade é aplicada na análise de segurança, por meio da avaliação da probabilidade de ocorrência dos eventos topo da árvore de falhas, e na formulação da função objetivo da otimização dos intervalos CMR. A modelagem adota a distribuição exponencial com taxa de falha constante, utilizando a aproximação $F(t) \approx \lambda \cdot t$, o que permite quantificar diretamente o risco associado a cada intervalo de manutenção. Especificamente nos casos em que múltiplos componentes atuam em conjunto para desempenhar uma função única no sistema, utiliza-se o conceito de confiabilidade equivalente por meio de arranjos em série ou em paralelo, conforme aplicação na Tabela 5.2.

Para aprofundamento teórico sobre os conceitos de confiabilidade utilizados, recomenda-se a obra de Ebeling (2010), que trata de maneira abrangente a modelagem e a fundamentação dos indicadores clássicos de confiabilidade.

3.4 Manutenção e Manutenibilidade

Neste trabalho, os conceitos de manutenção e manutenibilidade são abordados conforme definidos por Blanchard (2004), com foco nos elementos aplicados ao desenvolvimento da metodologia de planejamento de manutenção.

Manutenção é o processo de garantir que um sistema desempenhe continuamente sua função pretendida no nível de confiabilidade e segurança para o qual foi projetado (KIN-

NISON; SIDDIQUI, 2013). Este processo corresponde ao conjunto de ações destinadas a diagnosticar, reparar ou prevenir falhas em um sistema, com o objetivo de manter ou restabelecer seu nível de desempenho especificado. A figura 3.3 ilustra a atuação das manutenções preventivas e corretivas sobre o sistema.

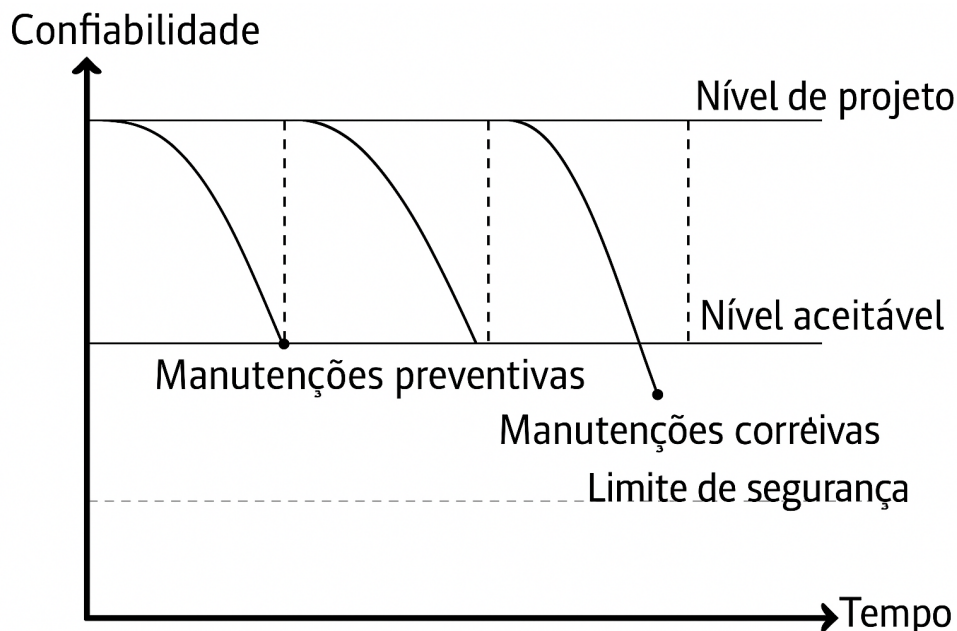


FIGURA 3.3 – Manutenções preventivas e corretivas.

Fonte: Adaptado de KINNISON (2013).

Os tipos de manutenção podem ser classificadas em:

- **Manutenção corretiva:** ações realizadas após a ocorrência de uma falha, com o objetivo de restaurar o sistema ao seu estado operacional. Costuma estar associada a custos elevados e a períodos de indisponibilidade mais prolongados.
- **Manutenção preventiva:** intervenções programadas de forma sistemática, realizadas antes da falha ocorrer, com o objetivo de preservar o desempenho do sistema e reduzir a probabilidade de falhas.
- **Manutenção preditiva:** baseada no monitoramento das condições de operação e no acompanhamento do desgaste dos componentes, permitindo a execução de intervenções somente quando forem identificados indícios de degradação.

Além das categorias tradicionais de manutenção, destaca-se no contexto de sistemas críticos a manutenção mandatória vinculada a requisitos de certificação, denominada *Certification Maintenance Requirements* (CMR). Esse conceito tem origem na aviação civil e está sendo adaptado neste estudo para sistemas nucleares.

De acordo com Tao (2022) e Bingbing *et al.* (2014), o processo de definição de CMR inicia-se com a identificação das *Candidate Certification Maintenance Requirements* (CCMR), que são atividades de manutenção candidatas propostas para mitigar falhas latentes com potencial impacto na segurança operacional. As CCMR são resultado da análise de segurança do sistema, usualmente estruturada por meio de árvores de falha (FTA) e estudos de confiabilidade.

Nem toda atividade classificada como CCMR torna-se obrigatoriamente uma CMR. As atividades propostas passam por uma avaliação técnica, levando em consideração fatores como a relevância da falha mitigada, a eficácia da tarefa de manutenção e o impacto na operação do sistema. Apenas aquelas tarefas cuja execução se demonstra essencial para manter a segurança operacional e atender aos requisitos normativos são formalmente incorporadas como CMR no plano de manutenção do sistema.

O plano de manutenção deste estudo contempla apenas as manutenções preventivas programadas, planejadas para garantir a continuidade operacional do sistema e as manutenções mandatórias CMR, destinadas a atender aos requisitos de segurança nuclear e certificação.

Uma característica intrínseca à arquitetura do sistema é a manutenibilidade que refere-se à facilidade e à rapidez com que um sistema pode ser submetido a uma manutenção. Impacta diretamente os tempos de indisponibilidade, os recursos logísticos requeridos e os custos de suporte ao longo do ciclo de vida. Um sistema com boa manutenibilidade permite a detecção rápida de falhas, a execução eficiente dos reparos e a realização de intervenções preventivas com impacto mínimo sobre a disponibilidade operacional.

No contexto deste trabalho, o conceito de manutenibilidade é aplicado na construção do calendário de manutenções, buscando maximizar a sinergia entre as atividades preparatórias e as atividades principais.

Neste estudo, não foi executada uma análise aprofundada sobre os indicadores clássicos de tempo médio para reparo (MTTR) e tempo médio de indisponibilidade (MDT), uma vez que foi adotada a premissa de que os tempos de intervenção são homogêneos entre as atividades planejadas.

Para aprofundamento nos conceitos de manutenção e manutenibilidade, recomenda-se Blanchard (2004).

3.5 Disponibilidade

Disponibilidade é a medida probabilística que expressa a capacidade de um sistema de estar operacional quando requerido para uso. No contexto de sistemas militares e

sistemas críticos, onde o objetivo é garantir a segurança e a continuidade operacional, a disponibilidade torna-se um parâmetro essencial a ser perseguido (BLANCHARD, 2004).

A disponibilidade de um sistema pode ser analisada sob diferentes óticas, dependendo do nível de detalhe desejado e das hipóteses assumidas para o comportamento das manutenções e reparos. Três conceitos clássicos são considerados para contextualização:

- **Disponibilidade Inerente** (A_i): considera apenas o tempo médio entre falhas (MTBF) e o tempo médio de reparo (MTTR), desconsiderando atrasos logísticos ou administrativos. É calculada por:

$$A_i = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (3.13)$$

- **Disponibilidade Alcançada** (A_a): considera o tempo médio entre quaisquer intervenções de manutenção (MTBM), incluindo manutenções preventivas, mas ainda sem considerar atrasos logísticos ou administrativos. \bar{M} é o tempo médio de manutenção ativa, isto é, a duração média das intervenções (diagnóstico, reparo, teste e retorno ao serviço). É expressa por:

$$A_a = \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \bar{M}} \quad (3.14)$$

- **Disponibilidade Operacional** (A_o): representa a condição real de operação, considerando manutenções corretivas e preventivas, tempos de atraso logístico e administrativo. Sua fórmula é:

$$A_o = \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \text{MDT}} \quad (3.15)$$

É importante destacar que os níveis de disponibilidade são dinâmicos ao longo do ciclo de vida do sistema. A coleta de dados operacionais permite a atualização dos parâmetros MTBF, MTTR e MDT, corrigindo as estimativas realizadas nas fases de concepção e desenvolvimento (MOUBRAY, 2001).

No desenvolvimento desta dissertação, o cálculo da disponibilidade adota uma abordagem prática, em que a métrica é definida como a razão entre o número de dias em que o sistema permanece disponível e o horizonte total de planejamento, representada por:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Dias Disponíveis}}{\text{Dias Totais do Planejamento}} \quad (3.16)$$

Considerando que o planejamento deste estudo contempla atividades de manutenção planejadas, a métrica proposta não incorpora falhas corretivas nem atrasos logísticos ou administrativos, partindo do pressuposto de que consumíveis e sobressalentes estão dis-

poníveis nas datas programadas. Dessa forma, a medida aproxima-se do conceito de disponibilidade inerente, mas distingue-se dele ao incluir os impactos das janelas de manutenção planejadas e das restrições operacionais ao longo do ciclo de vida do sistema. Assim, constitui um indicador intermediário entre a disponibilidade inerente e a operacional, adequado para o contexto de planejamento de manutenção.

Para aprofundamento nos conceitos teóricos de disponibilidade e suas aplicações na engenharia de sistemas, recomenda-se a leitura das obras de Blanchard (2004) e Moubray (2001).

3.6 Pesquisa Operacional

Pesquisa operacional é a disciplina que desenvolve e aplica métodos quantitativos para apoiar a tomada de decisões. Seu principal objetivo é modelar, analisar e otimizar processos, buscando o melhor aproveitamento possível dos recursos disponíveis (ARENALES *et al.*, 2006).

De forma geral, a pesquisa operacional combina formulações matemáticas com algoritmos de solução, oferecendo suporte à resolução de problemas como alocação de recursos, otimização de rotas, programação de atividades e gestão de estoques.

Entre as técnicas clássicas da pesquisa operacional, destacam-se:

- **Programação Linear:** modela problemas cujas relações entre variáveis e restrições são lineares. Ferramentas como o Método Simplex de Dantzig (1963) garantem a obtenção de soluções ótimas globais.
- **Programação Inteira:** é aplicada quando as variáveis de decisão devem assumir valores inteiros. Métodos como *Branch and Bound* de Land e Doig (1960) e *Branch and Cut* de Padberg e Rinaldi (1991) permitem encontrar a solução ótima, mas, em problemas de alta complexidade combinatória, o tempo de processamento pode se tornar inviável.
- **Heurísticas e Meta-heurísticas:** quando os métodos exatos tornam-se impraticáveis, recorrem-se a técnicas heurísticas, que buscam soluções de boa qualidade em tempo computacional reduzido. Entre as meta-heurísticas amplamente empregadas, destacam-se algoritmos genéticos, busca tabu e simulated annealing (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Nos estudos revisados, a pesquisa operacional é frequentemente utilizada na otimização de planos de manutenção, especialmente em sistemas críticos como aeronaves e instalações

industriais. Barbosa (2024) utiliza meta-heurísticas para otimizar a certificação, enquanto Mata Filho (2024) aplica formulações de programação inteira e heurística para otimizar o planejamento de manutenções, enfrentando o desafio da escalabilidade dos problemas ao adotarem também heurísticas para cenários mais complexos.

Esses trabalhos evidenciam a importância da escolha adequada entre métodos exatos e heurísticos conforme a dimensão e a estrutura do problema analisado.

Neste trabalho, a pesquisa operacional será utilizada na modelagem e otimização do plano de manutenção do sistema de resfriamento no cais de apoio. Inicialmente, um modelo de programação inteira é empregado para determinar os limites ótimos dos intervalos de atividades mandatórias (CMR). Posteriormente, uma heurística construtiva é aplicada para a construção do calendário completo de manutenções ao longo do horizonte de planejamento.

4 Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para a construção e otimização do plano de manutenção em sistemas críticos sujeitos a restrições de segurança e operacionais. A abordagem é estruturada em cinco etapas, a saber: análise de segurança, otimização dos intervalos CMR, análise de restrições operacionais, determinação de calendário de manutenção preliminar, e consolidação do calendário de manutenção discretizado. A seguir, são descritas essas etapas.

4.1 Visão geral do método proposto

A metodologia proposta também incorpora um calendário de manutenção discretizado diariamente, permitindo maior flexibilidade na alocação das atividades em comparação com métodos tradicionais que utilizam *grids* fixos de manutenção. Neste modelo, a única restrição de calendário considerada é a agenda do submarino, ampliando as possibilidades de solução e possibilitando um sequenciamento básico das tarefas.

A figura 4.1 apresenta um fluxograma que ilustra o método proposto. O processo inicia com a análise de segurança do sistema, identificando componentes críticos e requisitos normativos. Em seguida, aplica-se um modelo de otimização para definir os limites dos intervalos entre as CMR, considerando a confiabilidade do sistema e as restrições impostas pelas normas aplicáveis. Em seguida, faz-se uma análise das restrições operacionais, depois elabora-se um calendário de manutenção capaz de atender às demandas, e finalmente consolida-se um calendário de manutenção discretizado que respeite todas as restrições impostas.

Considerando sua aplicabilidade prática, a metodologia proposta é escalável e adaptável a diferentes tipos de sistemas, possibilitando a integração de múltiplos equipamentos e requisitos em um único planejamento. Isso pode ser útil tanto para o gerenciamento centralizado de uma base de suporte quanto para operadores de frotas, que precisam coordenar diversas unidades operacionais.

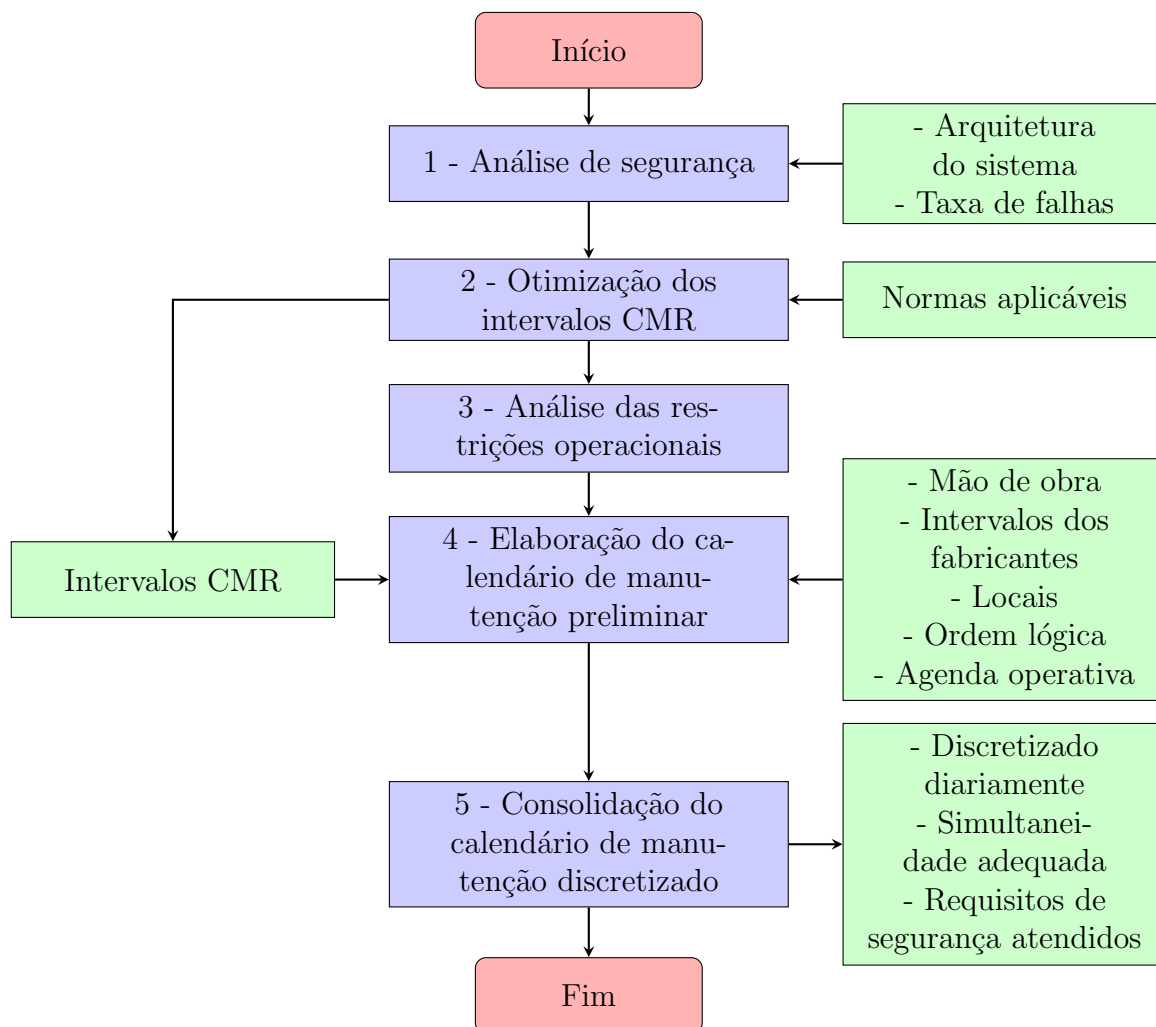


FIGURA 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta

Fonte: Autor (2025).

4.2 Metodologia de solução

A metodologia será apresentada conforme as cinco etapas descritas anteriormente.

4.2.1 Etapa 1: Análise de Segurança

A primeira etapa consiste na identificação das falhas que impactam a segurança do sistema, com base em uma modelagem por árvore de falhas (FTA), conforme os critérios definidos em norma aplicável. O objetivo é quantificar a probabilidade do evento topo e, a partir disso, identificar os componentes que requerem ações de manutenção a fim de controlar os períodos de latência. Essa análise fundamenta a definição das atividades mandatórias de manutenção (CCMR).

4.2.2 Etapa 2: Maximização dos Intervalos entre as CCMR

Com os componentes críticos identificados e os limites de probabilidade de falha estabelecidos, a segunda etapa busca maximizar os intervalos permitidos para execução das atividades de manutenção relacionadas à segurança e certificação (CCMR), respeitando as restrições de segurança impostas pela análise anterior. A formulação é feita por meio de um modelo de programação inteira, cuja função objetivo visa estender ao máximo os intervalos entre manutenções. Essa abordagem é uma adaptação do método proposto por Barbosa *et al.* (2023), originalmente desenvolvido para aplicações aeronáuticas.

4.2.3 Etapa 3: Análise das Restrições Operacionais

Nesta etapa, são levantadas todas as informações operacionais necessárias para a execução das atividades de manutenção. As variáveis que condicionam a viabilidade do calendário são mapeadas e tratadas como parâmetros no modelo de otimização. Os principais dados analisados incluem:

- Local de execução de cada atividade de manutenção;
- Capacidade máxima de trabalhadores simultâneos por local;
- Quantidade total de mão de obra disponível por período;
- Custo associado a cada atividade;
- Quantidade de trabalhadores exigidos por atividade;
- Agenda operacional do sistema, definindo períodos de indisponibilidade para manutenção; e
- Relação de atividades preparatórias e seus respectivos locais de aplicação.

4.2.4 Etapa 4: Elaboração do Calendário de Manutenção Preliminar

A quarta etapa consiste na construção inicial do calendário de manutenção, a partir dos intervalos entre CMR previamente maximizados e de algumas informações operacionais levantadas. As atividades principais são alocadas considerando os maiores espaçamentos possíveis dentro do horizonte de planejamento, respeitando os limites de intervalo estabelecidos. Em seguida, são inseridas as atividades preparatórias, associadas logicamente aos mesmos locais das atividades principais.

O objetivo nesta fase é obter um calendário com alto grau de empacotamento e máxima concentração de intervenções em janelas comuns, ainda sem considerar integralmente as

limitações operacionais. Trata-se, portanto, de uma solução preliminar, que prioriza a organização temporal das atividades com baixa aderência às restrições práticas de capacidade e simultaneidade.

4.2.5 Etapa 5: Consolidação do Calendário de Manutenção Discretizado

Na quinta e última etapa, o calendário preliminar é transformado em uma versão final discretizada, com todas as restrições operacionais devidamente incorporadas. Essa consolidação considera os recursos limitados de mão de obra, a capacidade máxima de trabalhadores por local, a necessidade de sequenciamento das atividades preparatórias e as janelas operativas do sistema.

4.3 Modelo de Otimização

A elaboração do calendário de manutenção é modelada como um problema de otimização inteira, com o objetivo de maximizar a disponibilidade do sistema ao longo do seu ciclo de vida. A seguir, são descritos os parâmetros, variáveis, função objetivo e restrições que compõem o modelo.

4.3.1 Parâmetros

Os parâmetros apresentados a seguir são constantes ou entradas do modelo que caracterizam as atividades de manutenção, os custos associados, as limitações operacionais e a disponibilidade do sistema. Eles foram definidos com base em dados técnicos e hipóteses estabelecidas para o cenário de aplicação do sistema de água de resfriamento.

4.3.1.1 Atividades

As atividades de manutenção foram categorizadas em três grupos: *servicing*, CMR e atividades preparatórias, necessárias para viabilizar as manutenções principais.

- *Servicing* ($AtvS_k$): conjunto de tarefas de manutenção preventiva (*servicing*), associadas aos componentes k do sistema. O conjunto é definido como:

$$AtvS = \{ AtvS_k \mid k = 1, \dots, k \}$$

- *Certification Maintenance Requirements* (CMR) ($AtvC_j$): conjunto de tarefas de

manutenção requeridas para a certificação do sistema, associadas aos componentes j . O conjunto é definido como:

$$AtvC = \{ AtvC_j \mid j = 1, \dots, j \}$$

- Atividades preparatórias ($AtvR_m$): conjunto de atividades preparatórias associadas aos respectivos locais m , garantindo o sequenciamento lógico das atividades principais. O conjunto é definido como:

$$AtvR = \{ AtvR_m \mid m = 1, \dots, m \}$$

4.3.1.2 Intervalos

Os intervalos das atividades *servicing* são definidos pelos fabricantes a fim de garantir o funcionamento adequado dos componentes. Dessa forma, esse parâmetro é tratado como uma constante.

- *Servicing* (ES_k): conjunto de intervalos máximos para os componentes k . Definido como:

$$ES = \{ ES_k \mid k = 1, \dots, k \}$$

- *Certification Maintenance Requirements* (CMR) (EC_j): conjunto de intervalos máximos para os componentes j . Estes intervalos são variáveis maximizadas na primeira fase da otimização e configuram dados de entrada para a segunda fase da otimização. Definido por:

$$EC = \{ EC_j \mid j = 1, \dots, j \}$$

- Atividades preparatórias: não há restrição de intervalos para as preparações.

4.3.1.3 Custos

Cada atividade possui um custo associado, os quais impactam na função objetivo da otimização toda vez que ocorrem durante o calendário.

- *Servicing* (CS_k): conjunto dos custos das *Servicing* de cada componente k . Definido como:

$$CS = \{ CS_k \mid k = 1, \dots, k \}$$

- *Certification Maintenance Requirements* (CMR) (CC_j): conjunto dos custos das CMR de cada componente j . Definido como:

$$CC = \{CC_j \mid j = 1, \dots, j\}$$

- Atividades preparatórias (CR_m): conjunto dos custos das atividades preparatórias de cada local m . Definido como:

$$CR = \{CR_m \mid m = 1, \dots, m\}$$

4.3.1.4 Locais

Cada atividade deve ser realizada em um local específico. Essa distinção é necessária, pois, entre as restrições apresentadas na Subseção 4.3.4, está a limitação espacial, que define o número máximo de trabalhadores simultâneos em um mesmo local, além da sinergia entre as atividades preparatórias para atividades que compartilham os mesmos locais.

- *Servicing* (LS_k): conjunto dos locais onde são executadas as *Servicing* dos componentes k . Definido como:

$$LS = \{LS_k \mid k = 1, \dots, k\}$$

- *Certification Maintenance Requirements* (CMR) (LC_j): conjunto dos locais onde são executadas as CMR dos componentes k . Definido como:

$$LC = \{LC_j \mid j = 1, \dots, j\}$$

- Atividades preparatórias (LR_m): conjunto dos locais onde são executadas as atividades preparatórias. Definido como:

$$LR = \{LR_m \mid m = 1, \dots, m\}$$

4.3.1.5 Trabalhadores

As tarefas de manutenção demandam recursos humanos específicos, cuja alocação é limitada tanto pela quantidade total disponível quanto pelas restrições de simultaneidade impostas pela capacidade de cada local.

- *Servicing* (QS_k): conjunto que define a quantidade de trabalhadores necessários para executar cada tarefa de manutenção preventiva (*servicing*) k . Definido como:

$$QS = \{ QS_k \mid k = 1, \dots, k \}$$

- *Certification Maintenance Requirements* (CMR) (QC_j): conjunto que define a quantidade de trabalhadores necessários para executar cada tarefa de manutenção CMR j . Definido como:

$$QC = \{ QC_j \mid j = 1, \dots, j \}$$

- Atividades preparatórias (QR_m): conjunto que define a quantidade de trabalhadores necessários para executar cada atividade preparatória m . Definido como:

$$QR = \{ QR_m \mid m = 1, \dots, m \}$$

- Mão de obra total disponível (Q): representa o total de mecânicos disponíveis para execução das atividades de manutenção do sistema. Este valor é constante por todo planejamento do sistema.

4.3.1.6 Disponibilidade do sistema

Os custos e o faturamento associados à disponibilidade e à indisponibilidade do sistema são parâmetros essenciais para a definição da função objetivo e influenciam diretamente a viabilidade econômica do planejamento de manutenção. Neste modelo, os valores associados ao faturamento e custos são discretizados de acordo com a periodicidade do calendário.

- Custo por Indisponibilidade (CD).
- Faturamento por Disponibilidade (FD).

4.3.1.7 Horizonte de planejamento

O horizonte de planejamento (D) define a quantidade total de períodos considerados na formulação do calendário de manutenção. A discretização é feita em unidades diárias, possibilitando maior precisão no controle das intervenções e um sequenciamento básico entre tarefas.

4.3.2 Variáveis

As variáveis do modelo matemático representam o estado operacional do sistema e a alocação das atividades de manutenção ao longo do tempo. Elas estão organizadas em três categorias principais: estado do sistema, intervalos máximos para atividades CMR e variáveis de alocação temporal das atividades de manutenção.

4.3.2.1 Estado do sistema

- Disponibilidade do sistema (A_d): variável binária que indica se o sistema está disponível no período d . Definida como:

$$A_d = \begin{cases} 1, & \text{se o sistema estiver disponível no período } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

- Indisponibilidade do sistema (M_d): variável binária que indica se o sistema está em manutenção no período d . Definida como:

$$M_d = \begin{cases} 1, & \text{se o sistema estiver em manutenção no período } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4.3.2.2 Intervalos máximos para as atividades CMR

Destaca-se que, apesar deste limite máximo ser um parâmetro de entrada para a função de elaboração do calendário de manutenção, ele é definido na otimização da Etapa 2, onde os intervalos máximos são as variáveis a serem maximizadas.

- Intervalo máximo (EC_j): representa o intervalo máximo permitido entre duas atividades consecutivas de CMR para o componente j , de acordo com a análise de segurança. Definido como:

$$EC = \{ EC_j \mid j = 1, \dots, j \}$$

4.3.2.3 Alocação de atividades de manutenção

As seguintes variáveis binárias indicam a alocação das atividades principais (*servicing* e CMR) e preparatórias ao longo dos períodos d . Essas variáveis compõem o calendário de manutenção durante o período planejado. Como a alocação deve considerar múltiplas atividades ao longo do tempo, essas variáveis são bidimensionais.

- *Servicing* (X_{dk}):

$$X_{dk} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa de manutenção preventiva } k \text{ for realizada no período } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

- *Certification Maintenance Requirement* (CMR) (Y_{dj}):

$$Y_{dj} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa de manutenção CMR } j \text{ for realizada no período } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

- Atividades preparatórias (Z_{dm}):

$$Z_{dm} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa complementar } m \text{ for realizada no período } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

4.3.3 Função objetivo

A função objetivo deste estudo busca maximizar a disponibilidade do sistema de resfriamento do cais ao longo de seu ciclo de vida operacional. A disponibilidade é um indicador fundamental, diretamente relacionado à segurança e confiabilidade do sistema. Ressalta-se também que a disponibilidade é otimizada por duas funções objetivos, a primeira busca maximizar os intervalos CMR e a segunda busca maximizar a disponibilidade do sistema por meio da alocação e empacotamento de tarefas eficientes ao longo do plano de manutenção.

4.3.3.1 Intervalos CMR

Uma estratégia para ampliar os intervalos entre as CMR consiste em maximizar a soma dos intervalos associados aos diferentes componentes do sistema. Essa abordagem busca estender o tempo entre intervenções sem comprometer os limites de segurança.

$$\max \left(\sum_j EC_j \right) \quad (4.1)$$

4.3.3.2 Alocação de tarefas

Para modelar a disponibilidade, utiliza-se uma abordagem financeira, que considera:

- O faturamento gerado durante os períodos de disponibilidade.
- Os custos associados às atividades de manutenção.
- Os custos decorrentes dos períodos de indisponibilidade.

Maximizar o lucro equivale a maximizar a produtividade do sistema, atendendo ao objetivo de disponibilidade, cumprindo os requisitos de segurança. As restrições impostas à elaboração deste calendário permite a solução atender aos critérios de tolerabilidade. A expressão 4.2 apresenta a função objetivo da elaboração do calendário de manutenção:

$$\max (Fat - C), \quad (4.2)$$

onde:

- *Fat*: Faturamento total ao longo do período analisado.
- *C*: Custo total ao longo do período analisado.

Formação do custo O custo total do sistema ao longo do período analisado é definido pelo somatório dos custos das atividades de manutenção e dos períodos de indisponibilidade. A equação que representa o custo total é dada pela seguinte equação:

$$C = \sum_{d=1}^D \left(M_d \cdot CD + \sum_k X_{dk} \cdot CS_k + \sum_j Y_{dj} \cdot CC_j + \sum_m Z_{dm} \cdot CR_m \right), \quad (4.3)$$

onde:

- M_d : Indisponibilidade do sistema no período d .
- CD : Custo por unidade de período de indisponibilidade.
- X_{dk} : Variável binária para a alocação de tarefas de manutenção preventiva.
- CS_k : Custo da tarefa de manutenção preventiva k .
- Y_{dj} : Variável binária para a alocação de tarefas de manutenção CMR.
- CC_j : Custo da tarefa de manutenção CMR j .
- Z_{dm} : Variável binária para a alocação de tarefas complementares.
- CR_m : Custo da tarefa complementar m .

Formação do faturamento O faturamento total associado ao sistema é definido como o produto entre os períodos em que o sistema permanece disponível e o valor de faturamento atribuído a cada período disponível. Essa formulação estabelece uma relação direta entre disponibilidade e ganhos financeiros, permitindo quantificar a disponibilidade sob uma perspectiva econômica. Ressalta-se que os valores utilizados são hipotéticos, adotados exclusivamente para fins de modelagem. O faturamento total é expresso pela equação:

$$Fat = \sum_{d=1}^D A_d \cdot FD, \quad (4.4)$$

onde:

- A_d : Disponibilidade do sistema no período d .
- FD : Faturamento por unidade de período disponível.

4.3.4 Restrições

As restrições estabelecidas no modelo matemático garantem a conformidade com os requisitos de segurança, a viabilidade operacional e a eficiência na alocação de recursos. A seguir, detalham-se as principais restrições aplicadas ao problema. As restrições 4.3.4.1 e 4.3.4.2 consistem em restrições de segurança, enquanto as demais são operacionais.

4.3.4.1 Restrição de segurança

A restrição de segurança impõe limites à probabilidade de ocorrência de eventos indesejados, conforme estabelecido pelas normas aplicáveis aos sistemas. Dessa forma, define os períodos máximos admissíveis de latência e estabelece os limites superiores para os intervalos entre as CMR.

Essa restrição pode ser representada matematicamente, de forma simplificada, por:

$$\sum_{i \in \text{evidente}} \lambda_i + \sum_{j \in \text{latente}} (\lambda_j \cdot EC_j) \leq P_{\max}, \quad (4.5)$$

onde:

- λ_i : taxa de falha dos eventos evidentes;
- λ_j : taxa de falha dos eventos latentes;
- EC_j : intervalo entre manutenções da CMR associada ao evento latente j ;

- P_{\max} : probabilidade máxima admissível para o evento topo.

4.3.4.2 Restrição de *hard time*

A restrição de *hard time* impõe um limite superior para o tempo de operação de um componente antes que ele seja obrigatoriamente substituído, independentemente de sua condição aparente. Essa abordagem é baseada no conceito de vida útil máxima, estabelecida pelo fabricante ou por critérios técnicos e regulatórios, visando evitar falhas catastróficas devido à degradação irreversível de materiais ou componentes (KINNISON; SIDDIQUI, 2013).

4.3.4.3 Restrição de intervalo entre manutenções preventivas

Os intervalos entre manutenções devem seguir as recomendações dos fabricantes, considerando as condições operacionais dos equipamentos.

4.3.4.4 Restrição de calendário operacional

Os sistemas em análise podem possuir um planejamento operativo definido para o seu ciclo de operação e suporte. Com isso, são estabelecidos períodos em que o sistema deve estar obrigatoriamente disponível para operação, estando, portanto, indisponível para a realização de atividades de manutenção.

Essa restrição é representada matematicamente por:

$$\sum_{d \in \mathcal{D}_{atracado}} M_d = 0, \quad (4.6)$$

onde:

- $\mathcal{D}_{atracado}$: Conjunto de dias nos quais o submarino estará atracado no cais.
- M_d : Variável binária que indica se o sistema está em manutenção no período d .

4.3.4.5 Restrição de estado do sistema

Essa é uma restrição lógica, na qual não é permitido que o sistema esteja disponível e em manutenção simultaneamente. As variáveis binárias A_d (disponibilidade) e M_d (manutenção) devem satisfazer a relação:

$$A_d + M_d = 1, \quad \forall d \quad (4.7)$$

4.3.4.6 Restrição de preparação

As atividades principais de manutenção requerem tarefas preparatórias que devem ser executadas previamente, estabelecendo uma sequência lógica no calendário de manutenção. Essa exigência é modelada pela seguinte expressão:

$$M \cdot Z_{dm} \geq X_{dk} + Y_{dj}, \quad \forall d, k, j, m \text{ em que } L_m = L_k \text{ ou } L_m = L_j, \quad (4.8)$$

onde:

- Z_{dm} : Variável binária que indica se a atividade preparatória m foi realizada no período d .
- M : Número inteiro, maior que o somatório de todas as atividades envolvidas no problema para validar a restrição.
- X_{dk} : Variável binária que indica se a atividade de manutenção preventiva k está alocada no período d .
- Y_{dj} : Variável binária que indica se a atividade de manutenção CMR j está alocada no período d .
- L_m : Local associado à atividade preparatória m .
- L_k, L_j : Locais associados às atividades principais de manutenção preventiva e CMR, respectivamente.

Adicionalmente, essas atividades podem ser executadas dentro de um intervalo de n períodos antes da tarefa principal, conforme equação abaixo:

$$\sum_{d'=d-n}^d M \cdot Z_{d'm} \geq X_{dk} + Y_{dj}, \quad \forall k, j, m \text{ em que } L_m = L_k \text{ ou } L_m = L_j \quad (4.9)$$

Onde:

- $d-n$ até d : Períodos anteriores ou até o mesmo do início da tarefa principal em que as atividades complementares podem ser realizadas.

4.3.4.7 Restrição de local

A restrição impõe que, em cada período d , o número total de trabalhadores alocados para atividades de manutenção em um local não ultrapasse o limite permitido. Assim, a equação que representa essa restrição é dada por:

$$\sum_{k \in L_l} QS_k X_{dk} + \sum_{j \in L_l} QC_j Y_{dj} + \sum_{m \in L_l} QR_m Z_{dm} \leq QL_l, \quad \forall l, d, \quad (4.10)$$

onde:

- L_l : Conjunto de tarefas atribuídas ao local l .
- QS_k : Quantidade de trabalhadores necessária para executar a tarefa de manutenção preventiva k .
- QC_j : Quantidade de trabalhadores necessária para executar a tarefa de manutenção CMR j .
- QR_m : Quantidade de trabalhadores necessária para executar a atividade complementar m .
- X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm} : Variáveis binárias que indicam a alocação das respectivas tarefas no período d .
- QL_l : Capacidade máxima de trabalhadores simultâneos no local l .

4.3.4.8 Restrição de mão de obra

O número total de trabalhadores alocados simultaneamente em todas as atividades de manutenção não pode exceder a quantidade total disponível no sistema.

$$\sum_k QS_k X_{dk} + \sum_j QC_j Y_{dj} + \sum_m QR_m Z_{dm} \leq Q \quad \forall d \in \{1, 2, \dots, D\}, \quad (4.11)$$

onde:

- QS_k : Quantidade de trabalhadores necessária para executar a tarefa de manutenção preventiva k .
- QC_j : Quantidade de trabalhadores necessária para executar a tarefa de manutenção CMR j .

- QR_m : Quantidade de trabalhadores necessária para executar a atividade complementar m .
- X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm} : Variáveis binárias que indicam a alocação das respectivas tarefas no período d .
- Q : Número total de trabalhadores disponíveis no sistema.

4.3.4.9 Restrição de Disponibilidade

Sistemas críticos, como aeronaves, embarcações militares e reatores nucleares, devem atender a requisitos mínimos de disponibilidade ao longo de sua vida útil. Esses requisitos asseguram que o sistema permaneça operacional durante o período de tempo adequado, atendendo a critérios de segurança e de produtividade.

Matematicamente, essa condição pode ser expressa como:

$$\frac{\sum_{d=1}^D A_d}{D} \geq \alpha, \quad (4.12)$$

em que A_d indica se o sistema está disponível no período d , D é o horizonte total de planejamento e α representa o nível mínimo de disponibilidade requerido para o sistema em análise.

5 Desenvolvimento

5.1 Estudo de Caso

Os submarinos de propulsão nuclear são essenciais para missões de longo prazo, desempenhando um papel fundamental em atividades de dissuasão. Submarinos demandam períodos regulares de manutenção e reabastecimento de consumíveis para garantir a operação contínua e eficiente. Durante esses períodos, é necessário que estejam atracados em suas bases de apoio, permitindo a execução de atividades de manutenção necessárias.

Nesses intervalos, a tripulação é reduzida ao número mínimo necessário, poupando recursos humanos. Embora o reator continue demandando o funcionamento de seus sistemas periféricos, muitos desses sistemas são desligados e preservados, entre eles o sistema de resfriamento embarcado. Nesse contexto, a responsabilidade pela remoção de calor do reator é transferida para o sistema de resfriamento do cais. No caso de falha do sistema no cais de apoio, o tempo necessário para reativar os sistemas embarcados e colocá-los novamente em operação adequada pode resultar na degradação dos componentes do submarino devido ao aumento da temperatura dos sistemas.

Portanto, embora seja fisicamente externo ao submarino, o sistema de resfriamento do cais torna-se, mesmo que temporariamente, parte integrante do suporte ao reator. Dessa forma, este sistema deve seguir as diretrizes normativas e atender aos requisitos de segurança estabelecidos.

Uma falha nesse sistema pode comprometer a pressão e vazão do fluido refrigerante, aumentando a reatividade do núcleo do reator e elevando a temperatura a níveis críticos. Isso pode resultar no rompimento de vasos de pressão e na liberação de materiais radiativos. Dada a importância desse sistema para a segurança, uma falha funcional desse sistema deve ser tratada como uma condição de usina (PC), de acordo com a AMERICAN NUCLEAR SOCIETY (1983), e respeitar os limites de probabilidade de ocorrência.

O quadro 5.1 apresenta um extrato de interesse da ANSI/ANS-51.1 com todos os eventos limitantes relacionados ao resfriamento do reator.

Quadro 5.1 – Extrato tabela 3-3 da ANSI/ANS-51.1

Exemplo de conjunto de operações normais e eventos de limitantes
<p style="text-align: center;">PC-1</p> <p style="text-align: center;">Não há eventos relacionados a perda de função de resfriamento</p>
<p style="text-align: center;">PC-2</p> <p style="text-align: center;">Perda parcial ou interrupção do fluxo de resfriamento do reator, excluindo o rotor bloqueado da bomba de resfriamento do reator</p> <p style="text-align: center;">Perda parcial de resfriamento de equipamentos relacionados à segurança ou resfriamento de área</p> <p style="text-align: center;">Despressurização do sistema de resfriamento do reator por operação inadvertida de um componente ativo</p> <p style="text-align: center;">Pequeno vazamento no sistema de resfriamento do reator ou sistema de conexão que não impediria o desligamento ordenado do reator e resfriamento usando apenas a reposição fornecida pelos sistemas normais de reposição</p> <p style="text-align: center;">Atuação inadvertida do sistema de resfriamento de emergência do núcleo</p> <p style="text-align: center;">Despressurização inadvertida do sistema de resfriamento do reator por pulverização normal</p>
<p style="text-align: center;">PC-3</p> <p style="text-align: center;">Vazamento do sistema de resfriamento do reator que não impede o desligamento e resfriamento controlados do reator</p> <p style="text-align: center;">Perda total ou interrupção do fluxo forçado do resfriamento do reator, excluindo o rotor bloqueado da bomba de resfriamento</p>
<p style="text-align: center;">PC-4</p> <p style="text-align: center;">Rotor bloqueado de uma única bomba de resfriamento do reator</p> <p style="text-align: center;">Purga do fluido refrigerante do reator por meio de múltiplas válvulas de segurança</p>
<p style="text-align: center;">PC-5</p> <p style="text-align: center;">Não há eventos relacionados exclusivamente a perda de função de resfriamento</p>

A norma classifica os eventos em condições de usina (PC) de acordo com sua frequência e gravidade. A condição PC-1 compreende eventos normais e rotineiros, esperados para ocorrer mais de uma vez por ano, sem impacto ao sistema. A PC-2 inclui eventos de mau funcionamento temporário, como falhas parciais sem comprometimento da segurança. Na PC-3, são consideradas as condições mais drásticas que incluem até um desligamento controlado do reator. A PC-4 exemplifica eventos severos, como o travamento do impelidor de qualquer bomba de resfriamento e situações de sobreaquecimento com o acionamento de sistemas de alívio de pressão. Por fim, a PC-5 caracteriza eventos extremos e irreversíveis de acidentes radiológicos e danos ao sistema primário do reator, onde os sistemas atuam somente como contenções para limitar a propagação dos efeitos.

Utilizando os próprios exemplos, interpretações e aplicações dos requisitos da norma, a perda de funcionamento do sistema de resfriamento de um reator nuclear deve atender requisitos quantitativos aplicáveis à PC-4, devendo ter probabilidade de ocorrência menor que 10^{-2} por ano, conforme a tabela 3.1.

5.1.1 Sistema de resfriamento no cais

O sistema de resfriamento do cais deve atender dois submarinos atracados em pontos distintos, denominados cais 1 e cais 2, cada qual associado a um submarino específico. Ambos os submarinos utilizam sistemas de resfriamento instalados em terra, que devem operar de forma independente.

Cada cais possui uma central de utilidades equipada com duas unidades de resfriamento e cada central é alimentada por uma subestação dedicada. No caso de falha de uma das subestações, a outra possui reserva de potência suficiente para alimentar mais uma central de utilidades simultaneamente. A distância entre os submarinos impossibilita que a mesma unidade de resfriamento consiga suprir os dois submarinos simultaneamente, devido às especificações técnicas das bombas e aos requisitos operacionais de fluxo refrigerante. A unidade titular de cada centro abastece prioritariamente o cais mais próximo, enquanto a unidade reserva é ativada em caso de falha do centro oposto, para suprir o cais mais distante. Essa distinção física de sistemas redundantes atende ao requisito de falha única da norma aplicável, e evita-se que um mesmo incidente, como um incêndio, ocasione a perda total da funcionalidade para um dos cais.

A figura 5.1 apresenta um desenho esquemático do funcionamento descrito acima.

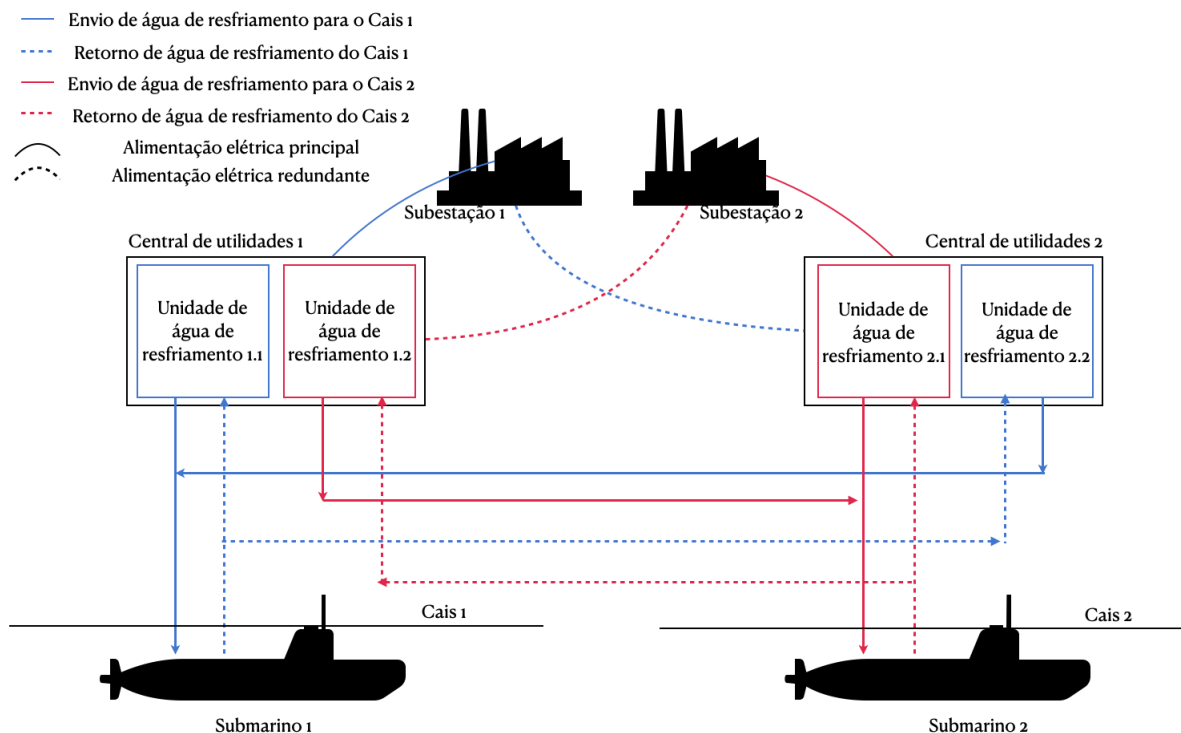


FIGURA 5.1 – Esquema do funcionamento das unidades de água de resfriamento

Fonte: Autor (2025).

5.1.2 Descrição do sistema

Para detalhar o sistema e seus componentes, considera-se o funcionamento necessário para resfriar o reator de um único submarino. O sistema de água de resfriamento opera em dois estágios principais:

- **Modo de operação 1:** Recirculação do fluido sem contato com o submarino, ajustando sua temperatura para operação.
- **Modo de operação 2:** Circulação do fluido com trocas térmicas: uma com o sistema de refrigeração e outra com o reator.

Cada unidade de água de resfriamento conta com uma bomba principal para viabilizar a recirculação e circulação. A recirculação é essencial para minimizar o intervalo de tempo entre a falha de uma unidade e a ativação da unidade reserva.

Além disso, cada unidade possui uma torre de resfriamento que opera com recirculação de água industrial e um sistema de ventilação. Essa recirculação é realizada por uma bomba auxiliar, equipada com redundância para maior confiabilidade.

A figura 5.2 ilustra a unidade titular da central de utilidades 1 e a unidade reserva da central de utilidades 2, responsáveis pela refrigeração do submarino 1.

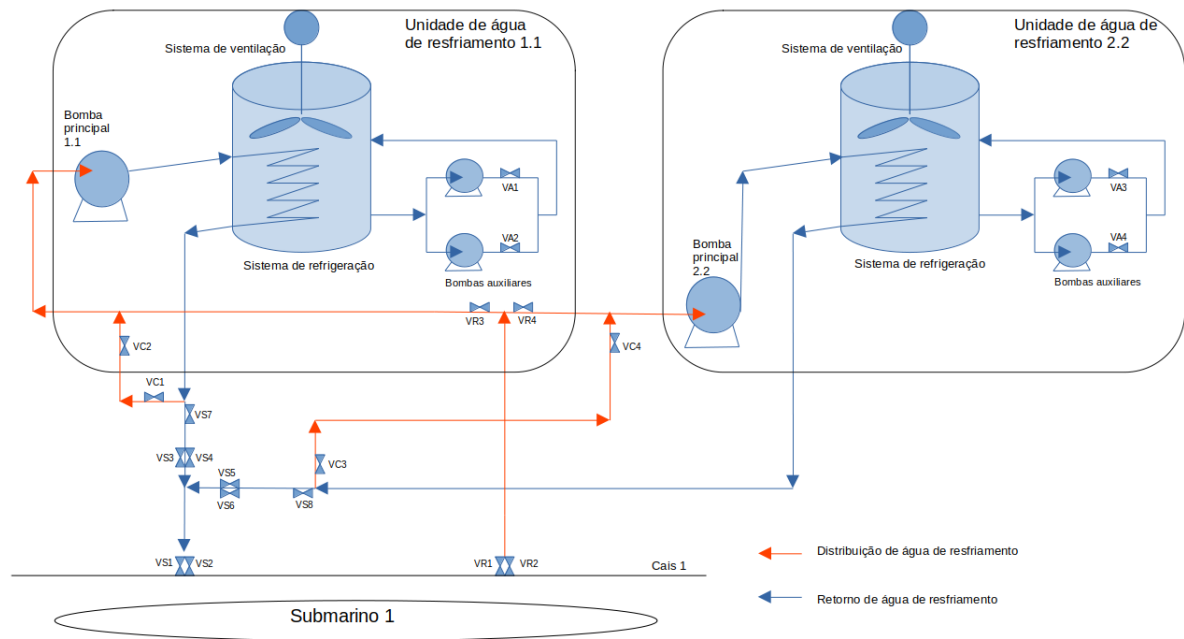


FIGURA 5.2 – Detalhamento do sistema de água de resfriamento

Fonte: Autor (2025).

O risco de contaminação radiológica do fluido do sistema de água de resfriamento do cais é desprezível e, portanto, não é considerado na análise de segurança. Isso se deve ao fato de que não há contato direto entre esse fluido e a água ativada do reator, uma vez que a transferência de calor ocorre por meio de trocadores de calor com o circuito secundário; ambos os circuitos são fechados e isolados.

5.2 Análise de segurança

A análise de segurança do sistema de resfriamento no cais será conduzida de forma a atender os requisitos de segurança da ANSI/ANS-51.1, a qual define três requisitos: o primeiro é que nenhuma condição perigosa pode ser iniciada após uma falha de único componente; o segundo é a inserção do modo de falha comum; e o terceiro é o cumprimento da probabilidade do evento limitante ser inferior ao valor estipulado pela norma.

O primeiro requisito pode ser verificado ao realizar uma avaliação das figuras 5.1 e 5.2, onde pode-se observar que o sistema é totalmente redundante, desde a alimentação elétrica, passando pela produção do fluido refrigerante e pelo sistema de circulação entre as unidades de resfriamento e o submarino. Portanto, a arquitetura apresentada atende ao primeiro requisito.

Quanto ao segundo requisito, será realizada a inserção explícita de modos de falha

comuns na modelagem da árvore de falhas. Essa inclusão visa representar falhas simultâneas em componentes redundantes sujeitas a uma causa compartilhada, como condições ambientais, falhas de projeto ou erros operacionais.

A representação será realizada por meio da inserção de um evento adicional de falha comum, conectado por uma porta lógica “OU” aos eventos básicos redundantes afetados. Esse evento comum terá sua taxa de falha definida como uma fração β da taxa de falha total do componente, conforme estabelecido pelo modelo *Beta Factor*. Essa abordagem é recomendada por referências como Kelly e Siu (1998) e Hauge *et al.* (2016).

Diante da premissa adotada nesta análise de desconsiderar os termos de segunda ordem nas portas “OU” e da aproximação da probabilidade de falha individual por $\lambda \cdot t$, o efeito do modo de falha comum pode ser representado de forma equivalente por meio de um aumento proporcional da probabilidade dos eventos básicos afetados. Assim, o impacto da falha comum é refletido diretamente na estimativa das probabilidades de falha, sem necessidade de estruturas adicionais no modelo. Neste trabalho, adota-se $\beta = 0,10$, que representa as médias de β apresentadas em Hauge *et al.* (2016).

O terceiro requisito refere-se ao cumprimento dos critérios quantitativos de segurança pela arquitetura do sistema. Para demonstrar essa conformidade com a norma, será realizada uma análise de segurança utilizando a técnica de árvore de falhas. Essa ferramenta, detalhada na Seção 3.1, conduz a avaliação a partir do evento topo, decompondo-o logicamente até os componentes básicos do sistema.

A tabela 5.1 lista os componentes do sistema, relacionando-os aos eventos básicos associados e às taxas de falha, as quais foram obtidas do banco de dados do NPRD 91, considerando parâmetros como tipo de componente, ambiente de operação e aplicação (UNITED STATES. Department of Commerce. National Technical Information Service. Reliability Analysis Center, b).

Além das informações apresentadas na tabela 5.1, todos os componentes são classificados quanto ao ambiente de operação como ‘fixo no solo’. As válvulas, em particular, falham principalmente devido ao emperramento, e esse modo de falha foi incorporado na probabilidade de falha do componente, conforme descrito na FMD 91 (UNITED STATES. Department of Commerce. National Technical Information Service. Reliability Analysis Center, a).

A falha das subestações é um evento significativo para a confiabilidade do sistema, sendo incluída na análise da árvore de falha. No entanto, a subestação é um sistema independente do sistema de resfriamento no cais, está fora do escopo de uma análise mais detalhada a nível de componente e não serão consideradas falhas latentes nesse sistema. A Marinha do Brasil adota, em estudos preliminares, uma taxa de falha de $6,9 \cdot 10^{-6}$ falhas por hora (f/h) para subestações. O relatório da REDE ELÉTRICA NACIONAL (Lisboa) (2022) apresenta dados de confiabilidade de sistemas elétricos, nos

TABELA 5.1 – Lista de componentes e taxas de falha

Evento/falha	Comp.	Tipo	Aplic.	λ (f/h)	β	λ_c (f/h)
Válvula saída <i>VS</i> Válvula retorno <i>VR</i> Válvula contorno <i>VC</i> Válvula auxiliar <i>VA</i>	Válvula	Água	MIL	$4,36 \cdot 10^{-7}$	10%	$4,80 \cdot 10^{-7}$
Bomba principal <i>PP</i> Bomba auxiliar <i>AP</i>	Bomba	Centrífuga	MIL	$1,20 \cdot 10^{-5}$	10%	$1,32 \cdot 10^{-5}$
Ventilador <i>FAN</i>	Ventilador	Axial	COM	$1,85 \cdot 10^{-6}$	10%	$2,03 \cdot 10^{-6}$
Motor principal <i>PEM</i> Motor auxiliar <i>AEM</i> Motor ventilação <i>VEM</i>	Motor elétrico	AC	MIL	$1,24 \cdot 10^{-6}$	10%	$1,36 \cdot 10^{-6}$
Trocador de calor <i>HE</i>	Trocador de calor	Geral	MIL	$9,04 \cdot 10^{-7}$	10%	$9,94 \cdot 10^{-7}$
Subestação <i>SS</i>	Conjunto	—	—	$6,90 \cdot 10^{-6}$	10%	$7,59 \cdot 10^{-6}$

quais é observada uma taxa média de falha de $8,75 \cdot 10^{-8}$ f/h por painel em subestações. Considerando que a alimentação da central de utilidades passa por quatro painéis em série dentro da subestação, a taxa de falha equivalente para cada subestação seria de $3,50 \cdot 10^{-7}$ f/h. Portanto, os valores utilizados nos estudos preliminares são conservadores e serão os adotados nesta análise.

A alimentação elétrica é cruzada e redundante, de maneira que cada subestação é capaz de manter o funcionamento das duas centrais de utilidades simultaneamente. Nesse contexto, a falha funcional de alimentação elétrica ocorre por meio de uma porta lógica "E", com uma taxa de falha equivalente de $1,225 \cdot 10^{-13}$ f/h.

Alguns componentes atuam em conjunto, desempenhando uma única função dentro do sistema de resfriamento no cais. Por essa razão, na análise de segurança, esses conjuntos são tratados como unidades funcionais, sendo atribuída a eles uma taxa de falha equivalente. Essa abordagem é coerente com as práticas de manutenção, uma vez que as atividades CMR envolvem testes funcionais que exigem a avaliação do conjunto completo. Em outras palavras, todos os componentes seguem o mesmo calendário de manutenção definido para o conjunto ao qual pertencem.

A análise de segurança, conduzida por meio da FTA, segue o seguinte processo: assume-se que um componente já tenha falhado, caracterizando uma falha latente. O evento topo é atingido por uma porta 'E' que é ativada por esta falha latente com uma outra falha evidente, que compromete a funcionalidade do ramal redundante. A figura 5.3 exemplifica este processo na construção da árvore de falha. Neste exemplo, o evento latente em questão é a falha da bomba principal da unidade de resfriamento 1.1 ($P1_L$) e os eventos evidentes são quaisquer falhas que, em conjunto com a falha latente, promovem

TABELA 5.2 – Equivalência de taxa de falhas em conjuntos de componentes

Eventos	Descrição	Modelo de confiabilidade	λ_{Eq} (f/h)
P_1 e P_2	Falha do conjunto motobomba principal	Entrada — PEM — PP — Saída	$1,46 \cdot 10^{-5}$
F_1 e F_2	Falha do conjunto moto-hélice de ventilação	Entrada — VEM — FAN — Saída	$3,39 \cdot 10^{-6}$
C_1 e C_2	Falha do circuito principal	Entrada — VS7 — VS3 — VC1 — VSS — VS6 — Saída VS4 — VC2 — VS8	$4,80 \cdot 10^{-7}$
AS_1 e AS_2	Falha do circuito auxiliar	Entrada — AEM1 — AP1 — VA1 — Saída AEM2 — AP2 — VA2	$2,26 \cdot 10^{-10}$

a perda da função do sistema de resfriamento no cais.

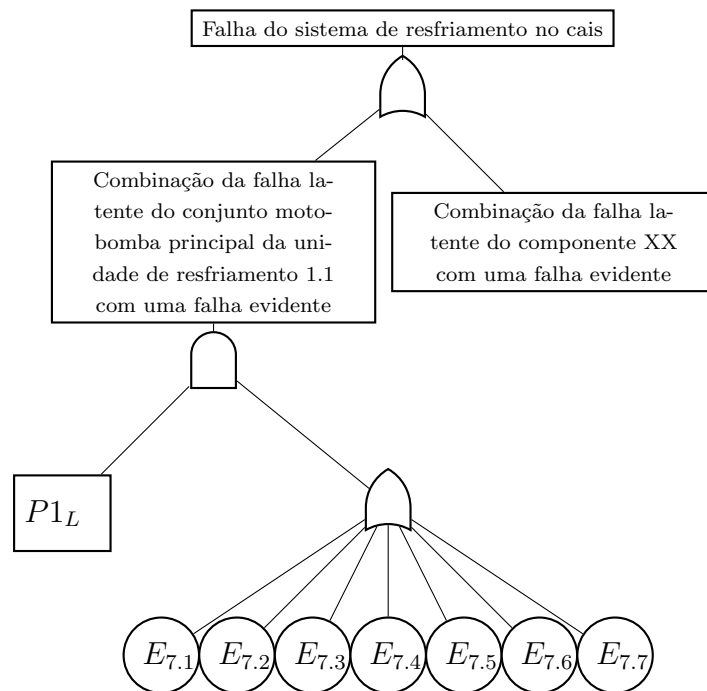


FIGURA 5.3 – Processo de construção da árvore de falha do sistema de resfriamento no cais.

Fonte: Autor (2025).

Para detalhar os eventos evidentes da FTA da figura 5.3, segue a tabela 5.3.

No processo de elaboração gráfica da FTA, os eventos da tabela 5.3 são agrupados em um único evento evidente (E_7) que representa a probabilidade de qualquer um dos eventos listados ocorrer. Onde:

TABELA 5.3 – Equivalência de taxa de falhas em conjuntos de componentes

Simbolo FTA	Equivalência	Descrição
$E_{7.1}$	$VS1 \cdot VS2$	Falha das duas válvulas de saída
$E_{7.2}$	$VR1 \cdot VR2$	Falha das duas válvulas de retorno
$E_{7.3}$	$C2$	Falha no circuito principal da central de utilidades 2
$E_{7.4}$	$P2$	Falha do conjunto motobomba principal da unidade de resfriamento 2.2
$E_{7.5}$	$F2$	Falha do conjunto moto-hélice de ventilação da torre de resfriamento da unidade de resfriamento 2.2
$E_{7.6}$	$HE2$	Falha do trocador de calor da torre de resfriamento da unidade de resfriamento 2.2
$E_{7.7}$	$AS2$	Falha do sistema auxiliar da torre de resfriamento da unidade de resfriamento 2.2

$$E_7 = \sum_{z=1}^7 E_{7.z} \quad (5.1)$$

A metodologia exemplificada pela figura 5.3 deve ser repetida exaustivamente com todos os componentes que podem apresentar falha latente. Inclusive, deve ser avaliada a possibilidade de perda da função do sistema mesmo sem nenhuma falha latente, originando um evento puramente evidente, conforme o evento E_{15} da figura 5.4, a qual inclui também as falhas das duas subestações. A figura 5.4 apresenta o resultado do processo de elaboração da árvore de falha completa do sistema de resfriamento no cais e a equação abaixo é a representação matemática da FTA.

$$\begin{aligned} \text{Evento topo} \geq & VS1_L \cdot E_1 + VS2_L \cdot E_2 + VR1_L \cdot E_3 + VR2_L \cdot E_4 + C1_L \cdot E_5 \\ & + C2_L \cdot E_6 + P1_L \cdot E_7 + P2_L \cdot E_8 + HE1_L \cdot E_9 + HE2_L \cdot E_{10} \\ & + F1_L \cdot E_{11} + F2_L \cdot E_{12} + AS1_L \cdot E_{13} + AS2_L \cdot E_{14} + E_{15} \end{aligned} \quad (5.2)$$

A probabilidade de falha latente (E_L) é estabelecida pelo produto entre a taxa de falha do componente (λ) e o intervalo CMR correspondente a esse componente, conforme a equação 5.3. Assim, componentes que compartilham a mesma taxa de falha e o mesmo intervalo entre as CMR são considerados equivalentes. Assumindo a premissa de que os intervalos atribuídos para componentes redundantes sejam idênticos, o sistema em questão apresenta as equivalências descritas pelas equações 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9.

$$E_L = \lambda \cdot (\text{Intervalo CMR}) \quad (5.3)$$

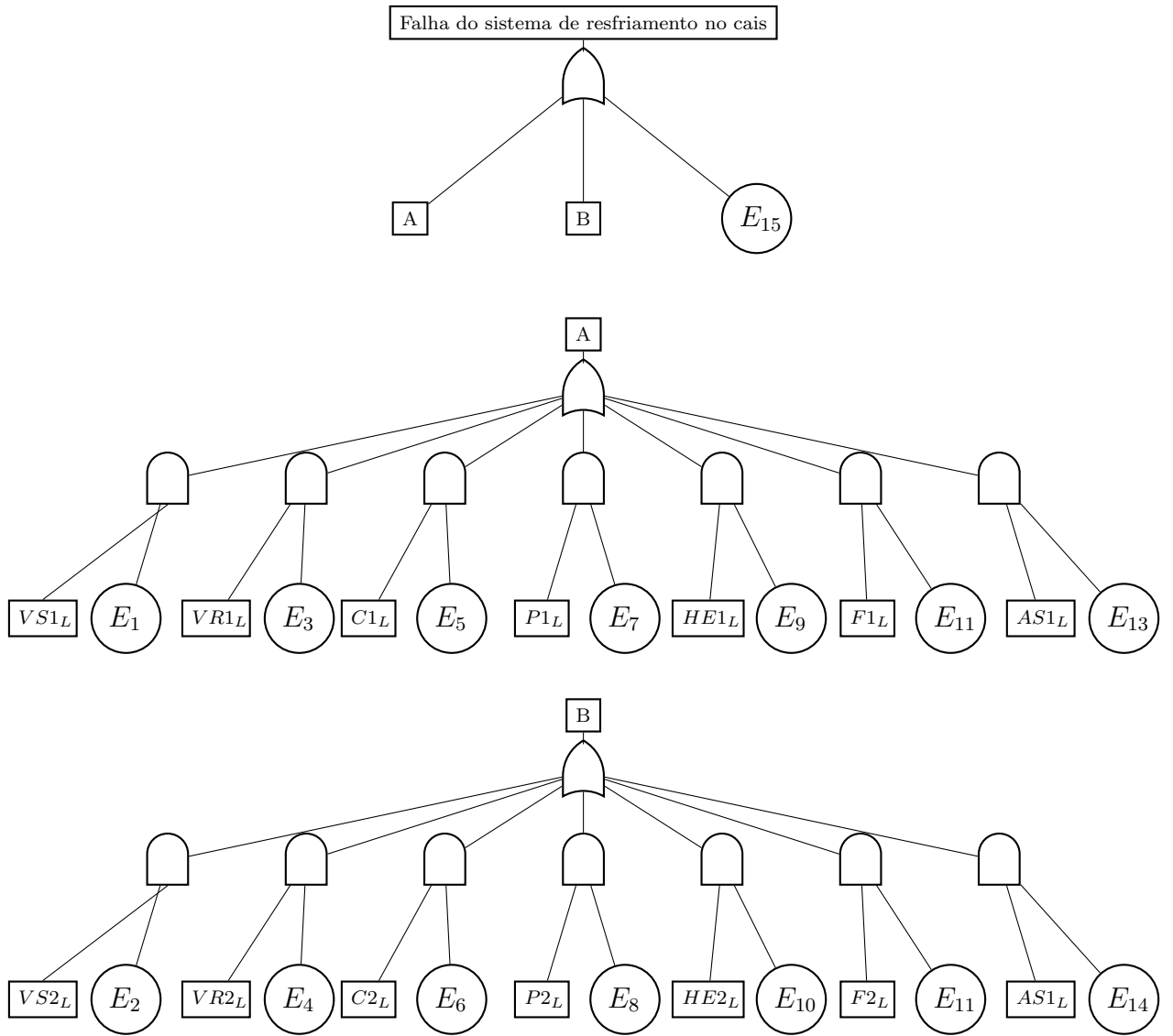


FIGURA 5.4 – Árvore de falhas completa.

Fonte: Autor (2025).

$$VS1_L = VS2_L = VR1_L = VR2_L = V_L \quad (5.4)$$

$$C1_L = C2_L = C_L \quad (5.5)$$

$$P1_L = P2_L = P_L \quad (5.6)$$

$$HE1_L = HE2_L = HE_L \quad (5.7)$$

$$F1_L = F2_L = F_L \tag{5.8}$$

$$AS1_L = AS2_L = AS_L \tag{5.9}$$

Essas equivalências são aplicadas à expressão 5.2 a fim de simplificá-la e obter a expressão 5.10. A figura 5.5 apresenta a nova FTA equivalente à nova expressão.

$$\begin{aligned} \text{Evento topo} \geq & V_L(E_1 + E_2 + E_3 + E_4) + C_L(E_5 + E_6) + P_L(E_7 + E_8) \\ & + HE_L(E_9 + E_{10}) + F_L(E_{11} + E_{12}) + AS_L(E_{13} + E_{14}) + E_{15} \end{aligned} \tag{5.10}$$

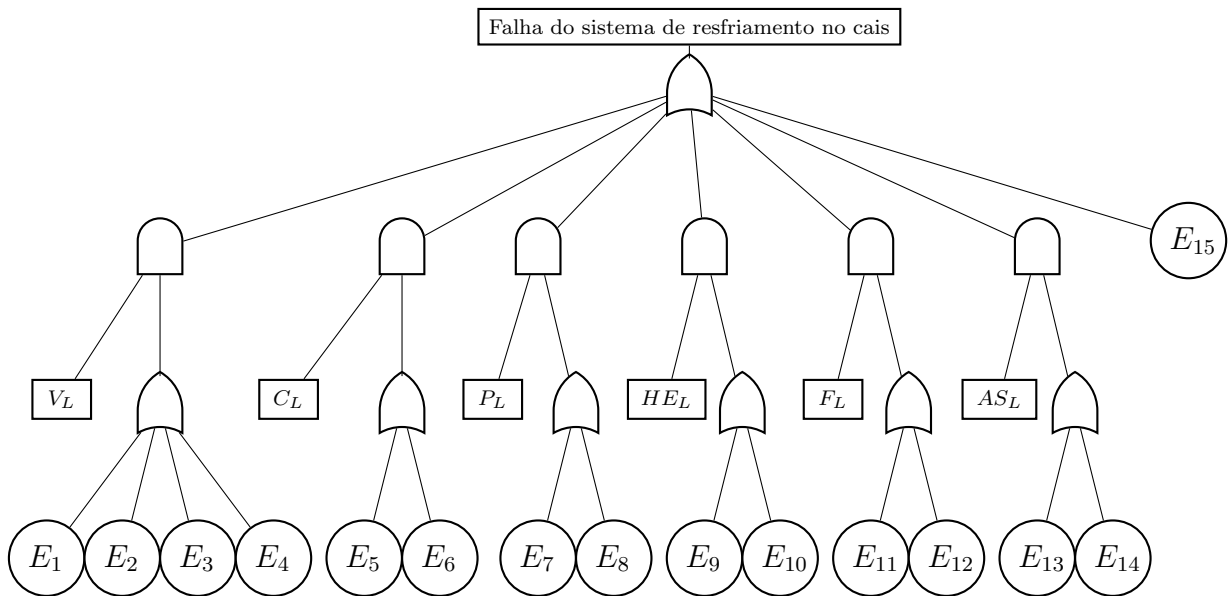


FIGURA 5.5 – Árvore de falhas equivalente.

Fonte: Autor (2025).

Os valores das probabilidades dos eventos evidentes (E_i) da figura 5.5 são apresentados na tabela 5.4.

TABELA 5.4 – Probabilidade dos eventos evidentes presentes nas figuras 5.4 e 5.5.

Evento evidente	λ (f/h)
$E_1 = E_2 = E_3 = E_4$	$4,80 \cdot 10^{-7}$
$E_5 = E_6 = E_7 = E_8 = E_9 = E_{10} = E_{11} = E_{12} = E_{13} = E_{14}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$
E_{15}	$4,35 \cdot 10^{-10}$

O objetivo da análise de segurança é estabelecer uma restrição que garanta o cumprimento do requisito de segurança da AMERICAN NUCLEAR SOCIETY (1983). A

expressão 5.10 apresenta a estrutura da restrição, a qual deve ser complementada com a equação 5.3 e com os valores das tabelas 5.1, 5.2 e 5.4. A restrição, apresentada na equação abaixo, é função dos intervalos CMR (EC_L), os quais são as variáveis que devem ser maximizadas na segunda etapa do trabalho.

$$9,22 \cdot 10^{-13} EC_{V_L} + 1,86 \cdot 10^{-11} EC_{C_L} + 5,66 \cdot 10^{-10} EC_{P_L} + 3,86 \cdot 10^{-11} EC_{HE_L} \\ + 1,32 \cdot 10^{-10} EC_{F_L} + 8,79 \cdot 10^{15} EC_{AS_L} + 4,35 \cdot 10^{-10} \leq \frac{10^{-2}}{AOR} \quad (5.11)$$

A ANSI/ANS-51.1 apresenta probabilidades mínimas anuais para as condições perigosas e como as taxas de falha são expressas em horas, o conceito de AOR (do inglês, *Annual Operating Time*) é inserido na restrição para equalizar a unidade nos dois termos.

5.3 Implementação Computacional

Este capítulo descreve a aplicação prática dos modelos matemáticos apresentados no Capítulo 4 ao longo das quatro etapas remanescentes após a análise de segurança. A análise inclui os dados de entrada adotados, a estrutura de restrições e a implementação das soluções.

5.3.1 Implementação da Etapa 2 - Otimização dos intervalos CMR

A implementação da otimização dos intervalos entre as atividades mandatórias de manutenção envolve a definição dos elementos fundamentais do modelo matemático e a incorporação de restrições técnicas e normativas. Os conceitos dessa etapa são modelados em uma programação inteira, utilizando a linguagem Python e a biblioteca PuLP. Esta etapa tem por objetivo determinar os maiores intervalos possíveis entre as CMR, sem comprometer a segurança do sistema.

Os principais elementos utilizados são:

- **Função objetivo:** maximizar os intervalos entre as CMR.

$$\max \left(\sum_{j=1}^6 EC_j \right) \quad (5.12)$$

- **Variáveis de decisão:** os intervalos entre CMR são definidos pelo vetor:

$$- EC = [EC_1, EC_1, EC_2, EC_2, EC_3, EC_3, EC_4, EC_4, EC_5, EC_5, EC_6, EC_6]$$

- **Conjunto de CMR:** são 12 atividades relacionadas a seis tipos de componentes do sistema:

$$- AtvC = [AtvC_{VS}, AtvC_{VR}, AtvC_{C1}, AtvC_{C2}, AtvC_{P1}, AtvC_{P2}, AtvC_{F1}, \\ AtvC_{F2}, AtvC_{H1}, AtvC_{H2}, AtvC_{A1}, AtvC_{A2}]$$

- **Restrição de segurança nuclear:** conforme discutido na Subseção 4.3.4, a segurança do sistema é assegurada por uma restrição que limita a probabilidade de ocorrência do evento topo. Considerando um sistema de funcionamento contínuo, tem-se um AOR de 8640 horas para o sistema de resfriamento. A restrição é representada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} & 9,22 \cdot 10^{-13} \cdot EC_1 + 1,86 \cdot 10^{-11} \cdot EC_2 \\ & + 5,66 \cdot 10^{-10} \cdot EC_3 + 3,86 \cdot 10^{-11} \cdot EC_4 \\ & + 1,32 \cdot 10^{-10} \cdot EC_5 + 8,79 \cdot 10^{-15} \cdot EC_6 \\ & \leq 1,1549 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (5.13)$$

onde:

- EC_j : intervalo CMR associada ao componente j ;
- Os coeficientes representam o produto entre a taxa de falha dos eventos latentes associados e a probabilidade do falha evidente;
- **Limite superior dos intervalos CMR:** os intervalos entre as CMR são limitados pelos valores máximos definidos para as manutenções preventivas (*servicing*), uma vez que essas já representam uma intervenção física no sistema e caracterizam uma espécie de restrição de *hard time*. Os limites por tipo de componente são:
 - **Ventiladores de torres de resfriamento:** manutenção anual (12 meses); balanceamento, alinhamento e limpeza (HVAC KNOW IT ALL, 2022), aplicável ao EC_4 .
 - **Válvulas de água desmineralizada:** manutenção bienal (24 meses); substituição de vedações e gaxetas (EMERSON, 2021), aplicável aos EC_1 e EC_2 .
 - **Bombas centrífugas:** manutenção anual; substituição de selos, alinhamento e limpeza (PUMPS; SYSTEMS, 2018; HYDRAULIC INSTITUTE, 2019), aplicável aos EC_3 e EC_6 .
 - **Motores elétricos:** manutenção anual; lubrificação e testes elétricos (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2020), aplicável aos EC_3 , EC_4 e EC_6 .

- **Trocadores de calor:** manutenção anual para limpeza e ensaios; substituição de juntas a cada 24 meses (ALFA LAVAL, 2018), aplicável ao EC_5 .

No caso de um intervalo ser afetado por mais de uma restrição de intervenção, é considerada a restrição com o menor intervalo.

5.3.2 Implementação da Etapa 3 - Análise das Restrições Operacionais

A terceira etapa consiste no levantamento sistemático de todas as condições necessárias para garantir a viabilidade do plano de manutenção. São considerados aspectos estruturais, operacionais e de recursos, que impõem restrições à alocação das atividades ao longo do calendário.

As informações levantadas nesta fase abrangem:

- o conjunto de atividades de manutenção a serem alocadas;
- os locais de execução das atividades;
- o horizonte de planejamento;
- a disponibilidade de mão de obra por período;
- a demanda de trabalhadores por atividade;
- a capacidade máxima de trabalhadores por local;
- os custos associados a cada atividade;
- os impactos financeiros por indisponibilidade e pela operação do sistema;
- a relação lógica entre as atividades principais e suas preparações;
- o calendário operativo do sistema.

Com base nessas diretrizes, define-se o seguinte conjunto de parâmetros:

- **Atividades de manutenção:**

- ***Servicing*** ($AtvS_k$): 12 atividades preventivas associadas a componentes específicos do sistema:

$$AtvS = [AtvS_{VS}, AtvS_{VR}, AtvS_{C1}, AtvS_{C2}, AtvS_{P1}, AtvS_{P2}, AtvS_{F1}, AtvS_{F2}, AtvS_{H1}, AtvS_{H2}, AtvS_{A1}, AtvS_{A2}]$$

- **Preparatórias** ($AtvR_m$): 4 atividades relacionadas aos locais de execução:
 $AtvR = [AtvR_1, AtvR_2, AtvR_3, AtvR_4]$
- **Local de execução das atividades:**
 - **Servicing** (LS_k): $LS = [L3, L4, L3, L4, L1, L2, L1, L2, L1, L2, L1, L2]$
 - **CMR** (LC_j): $LC = [L3, L4, L3, L4, L1, L2, L1, L2, L1, L2, L1, L2]$
 - **Preparatórias** (LR_m): $LR = [L1, L2, L3, L4]$
- **Horizonte de planejamento** (D): o calendário é discretizado em dias, com dois cenários testados:
$$D = \begin{cases} 1440 & (4 \text{ anos}) \\ 10800 & (30 \text{ anos}) \end{cases}$$
- **Mão de obra disponível** (Q): definida hipoteticamente como constante ao longo do tempo, no valor de 36 trabalhadores por período.
- **Demanda de mão de obra por atividade** (QSk):
 - **Servicing** (QS_k): $QS = [4, 4, 8, 8, 3, 3, 4, 4, 3, 3, 6, 6]$
 - **CMR** (QC_j): $QC = [2, 2, 4, 4, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 3, 3]$
 - **Preparatórias** (QR_m): $QR = [10, 10, 8, 8]$
- **Limite de trabalhadores por local** (QL_m): $QL = [20, 20, 24, 24]$
- **Custos das atividades:** conforme a hipótese apresentada na Subseção 1.3.1, os valores são hipotéticos e não se alteram entre as soluções.
 - **Servicing** (CS_k): $CS = [10000, 10000, 25000, 25000, 25000, 25000, 15000, 15000, 5000, 5000, 15000, 15000]$
 - **CMR** (CC_j): $CC = [2000, 2000, 5000, 5000, 1000, 1000, 1000, 1000, 500, 500, 4000, 4000]$
 - **Preparatórias** (CR_m): $CR = [5000, 5000, 3000, 3000]$
- **Parâmetros econômicos:**
 - Custo por dia de indisponibilidade: $CD = 15.000$
 - Faturamento por dia de operação: $FD = 50.000$
- **Regras de sequenciamento lógico:** cada atividade preparatória deve ser realizada até 7 dias antes da atividade principal ou no mesmo período. A associação é feita com base no local de execução.

- **Calendário operativo do sistema:** o sistema deve permanecer disponível durante os períodos em que o submarino estiver atracado. Considera-se que o cais será ocupado três vezes por ano, por 30 dias em cada ciclo.
- **Disponibilidade mínima (α):** no caso do sistema de resfriamento do cais de apoio ao submarino nuclear, estabeleceu-se $\alpha = 0,95$, ou seja, um requisito mínimo de disponibilidade de 95%. Esse valor foi definido com base no perfil operativo do meio apoiado: ao longo de seu ciclo de vida, o submarino permanecerá, no máximo, nove meses atracado por ano. Assim, o requisito de disponibilidade adotado mostra-se compatível com o cenário operacional e ainda contempla uma margem de segurança.

5.3.3 Implementação da Etapa 4 - Elaboração do Calendário de Manutenção Preliminar

Com os intervalos máximos entre CMR otimizados (Etapa 2) e todas as restrições operacionais devidamente caracterizadas (Etapa 3), a quarta etapa consiste na construção de um calendário preliminar de manutenção.

Os métodos de solução implementados para esta etapa são a programação inteira e uma heurística construtiva, elaborada pelo autor e detalhada na Seção 5.4. Nesse estágio, são introduzidos os principais elementos do modelo de alocação de atividades:

- **Função objetivo:** maximizar o lucro do sistema ao longo do horizonte de planejamento; e
- **Variáveis de decisão:** variáveis binárias de alocação temporal; X_{dk} para *servicing*, Y_{dj} para CMR e Z_{dm} para preparações, que indicam se determinada atividade é realizada no período d .

As atividades de manutenção são então alocadas em seus períodos ideais com base nos seguintes critérios:

- Respeito aos intervalos máximos entre manutenções;
- Alocação inicial das tarefas principais nos períodos mais espaçados possíveis;
- Sincronização das manutenções CMR e *servicing* de um mesmo componente, sempre que possível, para reduzir o número total de intervenções;
- Inclusão das atividades preparatórias, associadas aos mesmos locais das atividades principais, com antecedência mínima de 0 e máxima de 7 dias.

A versão preliminar do calendário considera abundância de recursos, capacidades quase inesgotáveis de capacidade de atendimento e permite visualizar os agrupamentos de atividades por intervalo de tempo, sem a granularidade diária nem a verificação direta das restrições operacionais.

5.3.4 Implementação da Etapa 5 - Consolidação do Calendário de Manutenção Discretizado

A quinta e última etapa consiste na transformação do calendário preliminar em um calendário final discretizado e operacionalmente viável. Nesta fase, são inseridas todas as restrições operacionais do sistema, permitindo a consolidação de uma solução factível dentro do ambiente de execução.

Os métodos de solução são os mesmos aplicados à etapa 4. As variáveis de decisão e a função objetivo permanecem as mesmas. Esta etapa incorpora as limitações práticas que afetam a execução das atividades:

- **Limitações de mão de obra:** número total de trabalhadores disponíveis por período e por local;
- **Capacidade dos locais:** quantidade máxima de intervenções simultâneas por área de execução;
- **Sequenciamento lógico das tarefas:** necessidade de execução prévia das atividades preparatórias antes das manutenções principais;
- **Calendário operacional do sistema:** janelas de indisponibilidade impostas pela agenda do submarino atracado, nas quais nenhuma manutenção pode ser realizada.

Essas restrições impõem uma reorganização da solução inicialmente proposta, com realocação de atividades para períodos viáveis, respeitando tanto a lógica de precedência quanto os recursos limitados. O objetivo é garantir que o calendário final:

- Seja exequível no contexto prático do sistema;
- Preserve, na medida do possível, os agrupamentos eficientes definidos na etapa anterior;
- Mantenha a disponibilidade do sistema em níveis elevados; e
- Evite penalidades financeiras relacionadas à indisponibilidade excessiva ou à má alocação de recursos.

5.4 Heurística para Planejamento de Manutenção

A heurística desenvolvida neste trabalho tem como objetivo viabilizar a construção de um calendário de manutenção operacionalmente viável, especialmente para horizontes de longo prazo. Sua estrutura respeita integralmente os mesmos princípios da formulação exata, mas busca soluções com menos tempo de processamento que a programação inteira.

A lógica da heurística foi organizada para atender, de forma sequencial, às Etapas 4 e 5 da metodologia proposta:

- **Etapa 4 — Elaboração do Calendário Preliminar:** construção de uma solução inicial baseada nos intervalos máximos permitidos;
- **Etapa 5 — Consolidação do Calendário Discretizado:** aplicação das restrições operacionais, reorganizando a alocação para gerar uma solução factível e otimizada.

Base da implementação

A heurística foi construída a partir de um código genérico da estratégia de busca *Multistart*, obtido em repositório online (TEAM, 2024). A partir dessa base, foram incorporados os parâmetros específicos do problema, as variáveis de decisão e as principais restrições operacionais e de segurança.

Nos testes iniciais, observou-se que a estratégia original apresentava elevado nível de ociosidade da mão de obra e má distribuição das tarefas pela alocação aleatória das atividades e baixa eficiência do empacotamento das atividades.

Ajustes realizados

Para adequar o algoritmo ao problema proposto, foram implementadas modificações importantes:

- Substituição da solução inicial aleatória por uma alocação estruturada, baseada nos intervalos máximos;
- Introdução de uma rotina de resolução de conflitos, para tratar limitações de mão de obra, capacidade local e janelas operacionais;
- Inserção de limites para as perturbações aleatórias, controlando a variabilidade entre iterações;
- Definição de um critério de parada baseado no número máximo de iterações e reinicializações da solução.

Diretrizes da heurística

A construção da heurística foi guiada por quatro princípios:

- Cumprir todas as restrições de segurança, operacionais e de recursos;
- Reduzir a ociosidade da mão de obra, otimizando o uso dos recursos disponíveis;
- Agrupar atividades por local e tempo, maximizando a sinergia entre atividades preparatórias e principais;
- Permitir a aplicação em calendários com longos horizontes de planejamento.

A figura 5.6 ilustra o fluxo geral da heurística e estabelece a seguinte sequência lógica:

Geração da Solução Inicial (Etapa 4):

- As atividades CMR e *servicing* são alocadas em seus intervalos máximos permitidos, sem considerar as restrições operacionais;
- São introduzidas as atividades preparatórias, respeitando o sequenciamento lógico por local e a janela de 7 dias antes da tarefa principal;
- Essa solução preliminar visa maximizar o espaçamento entre intervenções, reduzindo o número de janelas de manutenção.

O valor de 7 dias foi definido a partir da análise de soluções prévias, nas quais se verificou que as paradas de manutenção não ultrapassavam esse período. Assim, o intervalo foi considerado adequado para garantir que a atividade preparatória antecedente fosse concluída antes da execução da tarefa principal.

Resolução de Conflitos (Etapa 5):

- Caso as restrições de recursos humanos ou capacidade local sejam violadas, atividades são movidas para períodos anteriores ou posteriores;
- Quando uma tarefa colide com a agenda do cais, ela é automaticamente reagendada;
e
- O algoritmo realiza ajustes iterativos a fim de atender as restrições impostas.

Perturbação e Critério de Parada (Etapa 5):

- O calendário explora o conjunto de soluções possíveis por meio de perturbações controladas, buscando pequenas melhorias na função objetivo;
- Alterações sem impacto positivo são descartadas; e
- O critério de parada é definido por número de iterações e número máximo de reinitializações (ambos são dados de entrada do algoritmo).

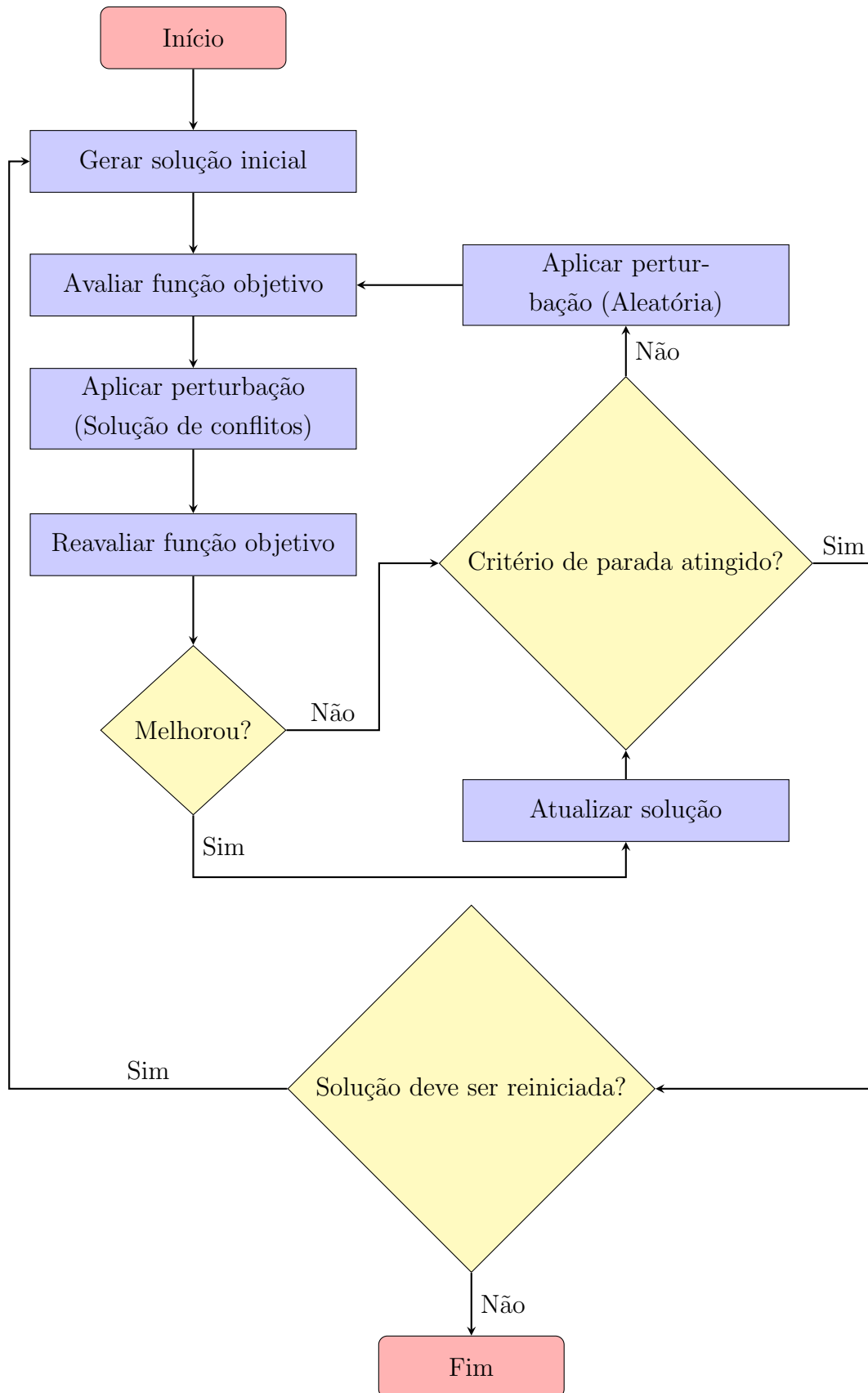


FIGURA 5.6 – Fluxograma da Heurística

Fonte: Autor (2025).

6 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio das implementações computacionais exata e heurística para a construção de soluções viáveis do calendário de manutenção. A análise crítica será realizada no Capítulo 7.

Antes da apresentação dos resultados obtidos, destaca-se que as soluções produzidas pelos algoritmos são exportadas em uma tabela. Esse formato permite visualizar, para cada período discretizado, o estado do sistema, as atividades programadas e a alocação de trabalhadores por local e total, evidenciando o caráter prático do modelo. A tabela 6.1 apresenta um extrato desse calendário de manutenção, ilustrando a forma como as informações são estruturadas para análise e apoio à decisão.

TABELA 6.1 – Extrato do calendário de manutenção exportado pelo código computacional.

Período	Estado do Sistema	Atividades Realizadas	L1	L2	L3	L4	Total	CD	FD
681	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
682	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
683	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
684	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
685	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
686	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
687	Manutenção/Preparação	AtvR1, AtvR2	10	10	0	0	20	10000	0
688	Manutenção/Preparação	AtvSC2, AtvSP2, AtvSF2, AtvSH1, AtvR3, AtvR4	3	7	8	16	34	74000	0
689	Manutenção/Preparação	AtvSVS, AtvSC1, AtvSP1, AtvSF1, AtvSH2, AtvSA1, AtvSA2	13	9	12	0	34	110000	0
690	Manutenção/Preparação	AtvSVR, AtvCVS, AtvCVR, AtvCC1, AtvCC2, AtvCP1, AtvCP2, AtvCF1, AtvCF2, AtvCH1, AtvCH2, AtvCA1, AtvCA2	10	10	6	10	36	37000	0
691	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
692	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
693	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
694	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
695	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
696	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000
697	Disponível		0	0	0	0	0	0	50000

Fonte: Autor (2025).

A seguir, são apresentados os resultados da Etapa 1 da metodologia e, posteriormente, os calendários de manutenção gerados pelos métodos exato e heurístico nas Etapas 4 e 5, considerando um horizonte de quatro anos. Por fim, apresenta-se a extrapolação da heurística para um horizonte de 30 anos, correspondente ao ciclo de vida do sistema apoiado.

6.1 Otimização dos intervalos CMR

A função objetivo da otimização da Etapa 1 consiste em maximizar o somatório dos intervalos CMR respeitando as restrições de segurança e de *hard-time*. Dessa forma, a tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 6.2 – Intervalos CMR maximizados

Intervalo CMR	Espaçamento maximizado (dias)
EC1	720
EC2	360
EC3	360
EC4	360
EC5	360
EC6	360

6.2 Otimização dos planos de manutenção

Os modelos utilizados na elaboração do calendário foram submetidos às mesmas condições iniciais, garantindo uma comparação justa entre as diferentes abordagens.

Com o objetivo de demonstrar a eficiência do método proposto, aplica-se a heurística na extrapolação para um horizonte de 30 anos. É importante destacar que sistemas nucleares possuem ciclos de vida longos e algoritmos exatos podem ser executados para períodos prolongados, desde que haja recursos computacionais disponíveis. Essa abordagem pode gerar economias significativas ao longo da fase de operação e suporte do sistema.

Para avaliar e comparar os resultados, os seguintes parâmetros foram considerados:

- **Disponibilidade do sistema:** o principal objetivo do estudo, busca-se maximizar a disponibilidade do sistema através do plano de manutenção elaborado pela metodologia proposta.
- **Custo total:** ainda que a minimização de custos não seja o objetivo primário, espera-se que a otimização da manutenção gere benefícios financeiros, sendo este um parâmetro secundário a ser analisado.
- **Tempo de solução:** este parâmetro é analisado apenas de forma comparativa. Para sistemas críticos com horizonte de planejamento de 30 anos, como é o caso do sistema nuclear em estudo, o tempo de processamento não é um fator limitante, desde que

a solução final seja viável e de qualidade. Assim, o tempo de execução serve apenas como referência entre as abordagens.

6.2.1 Solução Exata

A modelagem matemática e a implementação do método de otimização exata foram apresentadas na Seção 4.3. O modelo foi aplicado ao horizonte mínimo de 1440 períodos (4 anos), resultando nas seguintes métricas:

- **Disponibilidade do sistema:** 99,02%.
- **Custo total do calendário:** 969.000,00 unidades monetárias (UM).
- **Tempo de processamento:** > 40.000 segundos.
- **Gap de solução adotado:** 4%.

A figura 6.1 ilustra a distribuição das atividades planejadas ao longo do horizonte de planejamento para a abordagem exata.

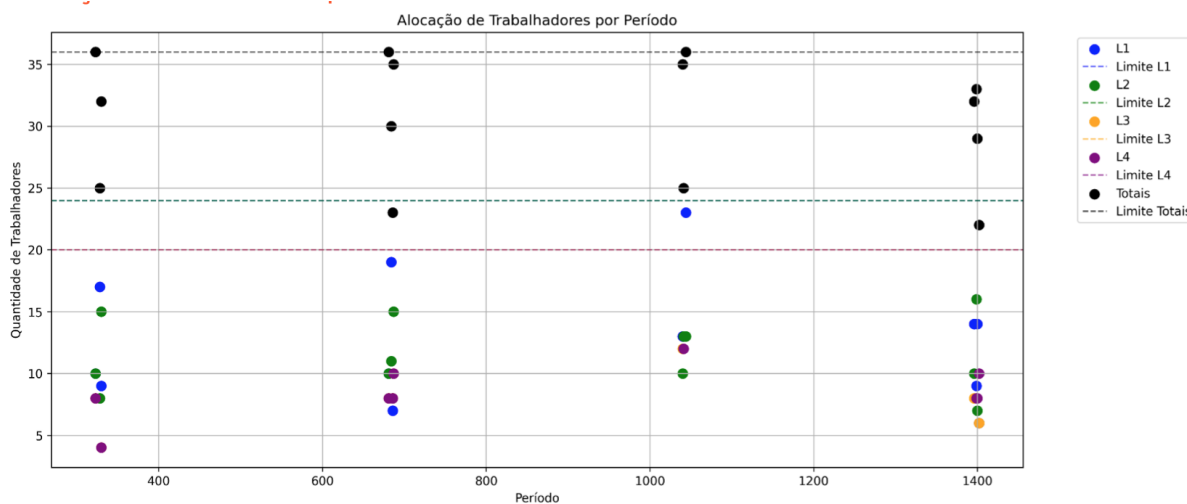


FIGURA 6.1 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Abordagem Exata (4 anos).

Fonte: Autor (2025).

Devido à elevada complexidade combinatória do problema, tornou-se necessário adotar um critério de parada na implementação da abordagem exata. O modelo foi resolvido por meio de programação inteira, e o critério de parada foi estabelecido após diversas tentativas de convergência ao ótimo global, considerando incrementos graduais de 1%. Assim, a solução obtida não corresponde exatamente ao ótimo global, mas representa um resultado adequado para servir como referência de comparação com a heurística. Essa

tolerância foi considerada aceitável porque a modelagem envolve variáveis inteiras e a função objetivo apresenta alta sensibilidade a pequenas variações.

6.2.2 Solução da Heurística

A heurística utilizada foi detalhada na Seção 5.4 e aplicada ao mesmo horizonte de 1440 períodos (4 anos). Os resultados obtidos foram:

- **Disponibilidade do sistema:** 99,02%.
- **Custo total do calendário:** 992.000,00 unidades monetárias (UM).
- **Tempo de processamento:** 109 segundos.

A figura 6.3 apresenta a distribuição das atividades planejadas e a alocação de trabalhadores ao longo do horizonte de 4 anos.

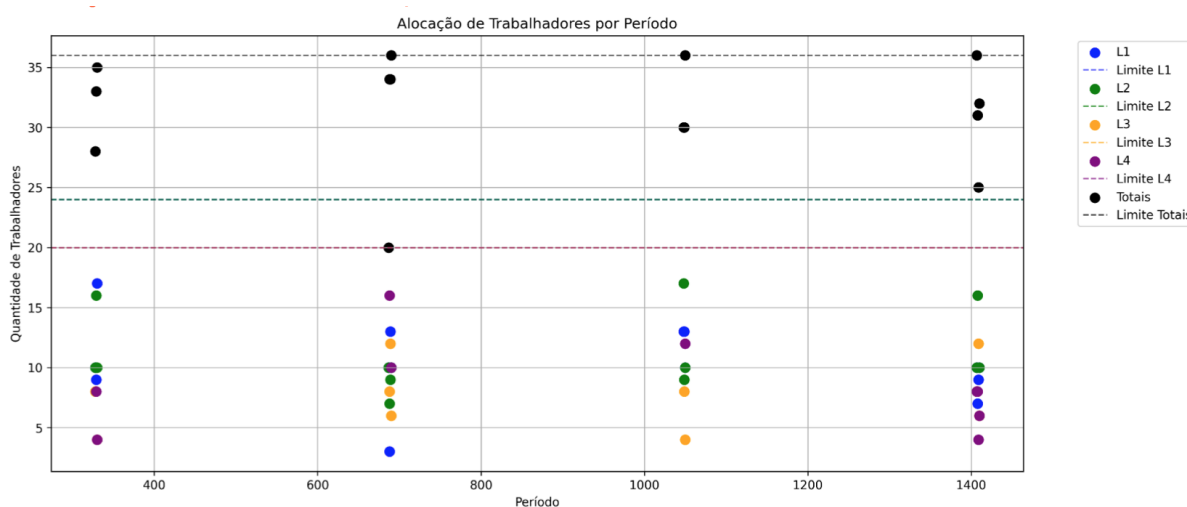


FIGURA 6.2 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Heurística (4 anos).

Fonte: Autor (2025).

A figura 6.3 também evidencia que todas as restrições de trabalhadores foi respeitada na solução elaborada.

6.2.3 Comparação Entre as Abordagens

A figura 6.3 resume os resultados obtidos pelas abordagens exata e heurística.

TABELA 6.3 – Comparação de Resultados: Abordagem Exata vs. Heurística.

Critério	Exata (4 anos)	Heurística (4 anos)
Disponibilidade (%)	99,02%	99,02%
Custo Total (UM)	969.000	992.000
Tempo de Processamento (s)	> 40.000	109

A figura ?? apresenta a comparação gráfica entre ambas as soluções, visualmente elas se comportaram de maneira semelhante, embora existam diferenças na solução.

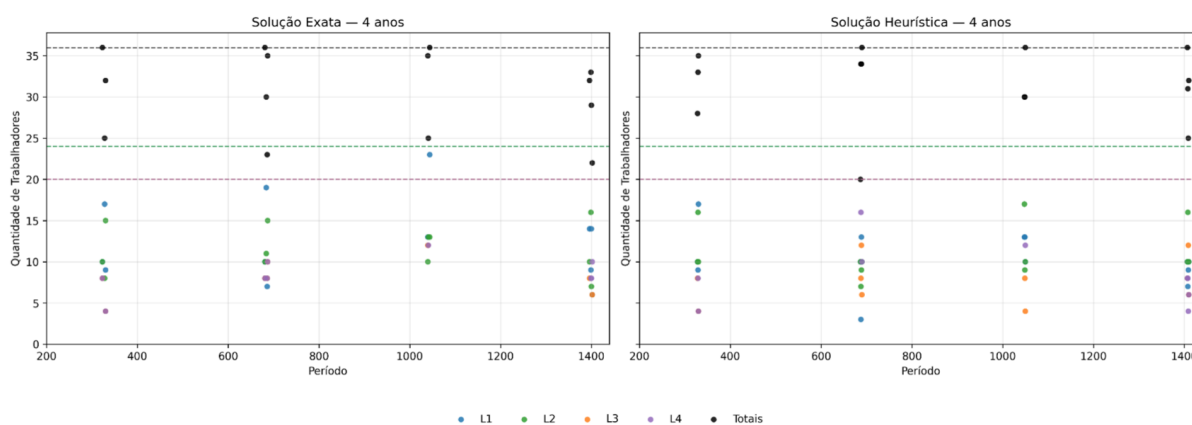


FIGURA 6.3 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Comparação.

Fonte: Autor (2025).

Observa-se que, entre os parâmetros avaliados, ambas as abordagens apresentaram a mesma disponibilidade do sistema, evidenciando desempenho equivalente nesse aspecto. No entanto, a abordagem exata alcançou um custo total de manutenção ligeiramente inferior ao obtido pela heurística, com uma diferença de aproximadamente 2,3%.

A equivalência na disponibilidade entre os métodos pode ser explicada pela natureza discreta do modelo, no qual um único dia a mais ou a menos de disponibilidade impacta significativamente a função objetivo. Além disso, a necessidade de adoção de um critério de parada na programação inteira justifica a convergência entre as soluções.

Diante da comparação dos resultados, a heurística desenvolvida foi considerada adequada para aplicação em horizontes de planejamento mais extensos. E se mostra uma ferramenta útil para a construção de calendários de manutenção viáveis, mesmo em cenários que envolvem múltiplas restrições operacionais e exigências normativas associadas à certificação de segurança.

6.3 Extrapolação para 30 anos de planejamento

Apesar do desempenho superior da programação inteira em horizontes curtos, sua aplicação para planejamentos mais longos, como o de 30 anos, revelou-se inviável diante das limitações computacionais. Mesmo após mais de 600.000 segundos de processamento, aproximadamente uma semana, o algoritmo não atingiu o critério de parada, mesmo com o *gap* relaxado para 15%. O tempo necessário para alcançar uma solução dentro desse limite inviabilizou a adoção da abordagem exata para horizontes extensos neste estudo. Por esse motivo, a extrapolação para 10.800 períodos (30 anos) foi conduzida exclusivamente com a heurística, cuja aplicação demonstrou não apenas sua escalabilidade, mas também sua capacidade de acomodar, futuramente, a integração de outros sistemas críticos ao planejamento.

Os resultados foram:

- **Disponibilidade do sistema:** 98,87%;
- **Custo total do calendário:** 7.720.000,00 unidades monetárias; e
- **Tempo de processamento:** 21.000 segundos.

A figura 6.4 apresenta a distribuição das atividades planejadas ao longo de 30 anos.

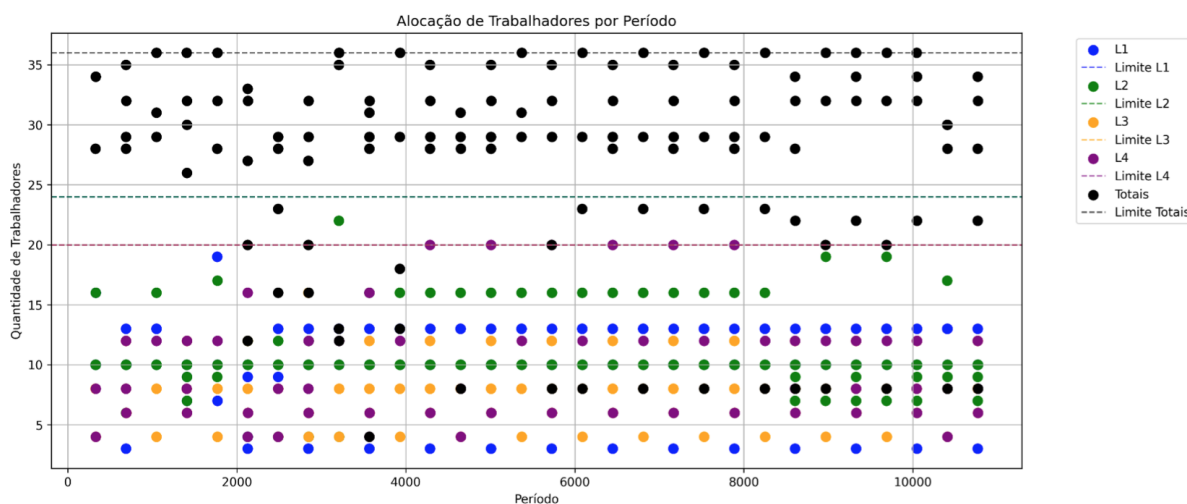


FIGURA 6.4 – Alocação de trabalhadores ao longo do tempo - Heurística (30 anos).

Fonte: Autor (2025).

A redução na disponibilidade em relação ao planejamento de 4 anos foi inferior a 1%, o que demonstra que o modelo manteve-se útil mesmo com o aumento do horizonte de planejamento.

Ressalta-se que, em todos os cenários analisados, o requisito de disponibilidade mínima foi atendido, demonstrando a consistência do modelo em relação ao perfil operativo do submarino e ao critério de tolerabilidade estabelecido.

7 Análise Crítica

O presente capítulo apresenta uma reflexão crítica sobre os resultados obtidos com a aplicação do método proposto. Diferentemente do capítulo de resultados, que se concentrou em expor os desempenhos alcançados pelas abordagens exata e heurística, aqui busca-se discutir aspectos qualitativos do método, identificando pontos fortes, limitações e oportunidades de aprimoramento. A análise é conduzida em duas frentes principais: inicialmente, examina-se a otimização dos intervalos CMR, avaliando suas restrições e impactos; em seguida, são discutidos os calendários de manutenção, considerando critérios como empacotamento das atividades, uso de recursos, ociosidade da mão de obra e escalabilidade da heurística em horizontes mais longos. As observações reunidas neste capítulo servirão de base para as conclusões finais e para a proposição de trabalhos futuros.

7.1 Análise Crítica da Otimização de Intervalos CMR

A otimização dos intervalos CMR demonstrou-se eficaz ao estender os limites de tempo sem manutenção, atendendo aos critérios de segurança e certificação. Todavia, os intervalos resultantes foram, em sua totalidade, limitados pelos intervalos já definidos para a manutenção preventiva. Isso indica que o alcance do método foi reduzido, pois a modelagem atual não contemplou possibilidades de simplificação das atividades preventivas.

Esse resultado sugere duas implicações importantes:

- a eficácia do modelo depende fortemente da forma como as manutenções preventivas são definidas na fase de engenharia de manutenção; e
- há espaço para evoluções na otimização das CMR, se as preventivas forem tratadas em conjunto.

Portanto, um refinamento futuro incluiria a adoção de taxas de falha dependentes do tempo, a fim de inserir-se análises sobre o impacto das atividades de manutenção preventiva no tempo de vida útil dos componentes. Ampliando a margem de manobra do otimizador e permitindo maior ganho em produtividade.

7.2 Análise Crítica dos Calendários de Manutenção

7.2.1 Solução Exata (4 anos)

A abordagem exata cumpriu o papel como referência de qualidade, respeitando todas as restrições operacionais e de segurança. No entanto, foi identificado que o tempo computacional elevado, se comparado à heurística, inviabilizou a aplicação da abordagem exata para horizontes de planejamento mais extensos.

Isso sugere que novas estratégias de solução podem ser aplicadas na modelagem da otimização, principalmente ao fragmentar o planejamento e utilizar a memória dos períodos anteriores.

7.2.2 Solução Heurística (4 anos)

A heurística mostrou bom desempenho em relação ao empacotamento e uso de mão de obra, com resultados semelhantes ao exato. Contudo, algumas críticas são elencadas:

- a solução é altamente dependente da qualidade da solução inicial; e
- não há mecanismo de diversificação suficiente para explorar regiões alternativas do espaço de busca.

A heurística pode convergir para soluções viáveis, mas não ótimas. Refinamentos futuros poderiam incluir novas estratégias de diversificação ou integração com alguma meta-heurística.

7.2.3 Solução Heurística (30 anos)

A análise do horizonte de 30 anos evidenciou o principal mérito da heurística: sua capacidade de escalabilidade. No entanto, surgiram limitações progressivas:

- após cerca de 12 anos de planejamento, observa-se degradação do empacotamento das atividades, gerando períodos de ociosidade;
- o modelo não contempla mecanismos, que poderiam recalibrar parâmetros ao longo do ciclo de vida; e
- a heurística não incorpora uma função de retroalimentação que aprenda com as soluções parciais para melhorar as próximas.

Esses pontos indicam que, embora adequada para longos horizontes, a heurística pode ser enriquecida com a integração de mais métodos a fim de combinar eficiência com qualidade.

A disponibilidade mínima foi satisfeita ao longo de todo o horizonte de planejamento. A aderência simultânea ao critério de disponibilidade e ao critério de tolerabilidade evidencia a utilidade prática do calendário de manutenção desenvolvido.

7.3 Conclusão da Análise Crítica

A análise crítica evidenciou que:

- a otimização de intervalos CMR é limitada pela forma como as manutenções preventivas são inicialmente definidas;
- a abordagem exata é útil como referência, mas carece de implementação de novas estratégias a fim de possibilitar um método escalável;
- a heurística cumpre sua função tanto para horizontes curtos quanto para os mais extensos. É dependente da solução inicial e carece de mecanismos de diversificação; e
- todas as soluções atenderam ao critério de tolerabilidade estabelecido para o perfil operativo do sistema.

Essas observações fornecem insumos diretos para a conclusão e para a seção de trabalhos futuros, especialmente em três frentes de aprimoramento:

1. integração da otimização dos CMR com atividades preventivas;
2. aprimoramento da função objetivo e das estratégias de diversificação; e
3. desenvolvimento de versões híbridas e adaptativas da heurística para horizontes extensos.

8 Conclusão e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as principais conclusões do estudo, destacando o impacto da metodologia proposta na otimização do planejamento de manutenção de sistemas críticos. Além disso, são discutidas as contribuições da pesquisa, suas limitações e direções para trabalhos futuros.

8.1 Conclusões Principais

O principal diferencial deste estudo foi a conciliação entre diferentes abordagens de análise para formular um método integrado de planejamento de manutenção. A proposta uniu análise de segurança, modelagem matemática e otimização computacional, garantindo um calendário de manutenção viável para sistemas com requisitos de segurança.

Os resultados apresentaram soluções viáveis, dentro das limitações estabelecidas na hipótese, e com capacidades otimizadas, confirmando que a metodologia é uma alternativa para o planejamento de manutenção de sistemas complexos e com requisitos de confiabilidade normativos.

8.2 Contribuições do Estudo

A pesquisa apresenta avanços tanto na literatura acadêmica quanto nas aplicações práticas da otimização de manutenção.

8.2.1 Contribuição Acadêmica

- Desenvolvimento de uma metodologia abrangente, que une restrições normativas e operacionais, para otimização do planejamento de manutenção de sistemas críticos com requisitos de segurança.

8.2.2 Contribuições Práticas

- O modelo é aplicável a diferentes sistemas críticos, incluindo infraestruturas navais, industriais, aeronáuticos, aeroespaciais, nucleares e de suporte operacional.
- Possibilidade de implementação do método em bases militares e usinas de energia, a fim de reduzir custos, maximizar a disponibilidade operacional, facilitar o planejamento e subsidiar decisões.
- Proposição de uma heurística para planejamento de manutenção, aplicável para sistemas de longo ciclo de operação e suporte.

O principal impacto do estudo foi a inserção de restrições operacionais ao método de otimização das CCMR/CMR, além de estender o estudo com a alocação e empacotamento de tarefas.

8.3 Limitações da Pesquisa

Apesar dos avanços obtidos, algumas limitações foram identificadas:

- O modelo não considera manutenções emergenciais, assumindo que todas as intervenções são planejadas previamente.
- A degradação do empacotamento da solução ao longo de 30 anos indica que ajustes periódicos no calendário podem ser necessários para manter a eficiência do planejamento.
- O modelo ainda não consegue avaliar eficientemente paradas para manutenção fora do padrão estabelecido, normalmente seriam paradas fora do *grid* com o objetivo de reduzir o número de intervenções ao longo do ciclo de vida do sistema.
- O método não inclui as manutenções preditivas.
- As manutenções preventivas configuram a limitação prática dos intervalos CMR e, conseqüentemente, restringem os benefícios econômicos deste estudo.
- A premissa da aleatoriedade das falhas desconsidera as conseqüências do envelhecimento dos componentes na confiabilidade do sistema.

8.4 Trabalhos Futuros

Com base nas conclusões e limitações identificadas, algumas sugestões para pesquisas futuras incluem:

- Desenvolvimento de um planejamento dinâmico, que permita reajustes automáticos ao longo do tempo, conforme novas informações operacionais forem incorporadas.
- Integração do modelo com inteligências artificiais, permitindo a previsão de falhas emergenciais, a adaptação do calendário de manutenção de forma automatizada e identificação de pontos críticos na atividade de manutenção.
- Expansão da modelagem para otimização de múltiplos sistemas críticos simultaneamente, otimizando a alocação de recursos e reduzindo custos operacionais.
- Validação da heurística com dados operacionais reais, testando sua aplicabilidade em ambientes industriais, militares ou energéticos.
- Desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem aumentar o intervalo entre as manutenções ou até mesmo excluí-las dos planos de manutenção.
- Pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e materiais que contribuam para a redução das taxas de falha em sistemas críticos, acompanhada da análise de viabilidade financeira para investimentos voltados à otimização de planos de manutenção em larga escala.

Essas direções futuras podem contribuir para as pesquisas na área de manutenção de sistemas.

A continuidade desta pesquisa permitirá refinar ainda mais a metodologia, incorporando novas técnicas e pesquisas. Espera-se que os achados deste estudo contribuam para o avanço do planejamento de manutenção, beneficiando tanto a comunidade acadêmica quanto os setores industriais.

Referências

ALFA LAVAL. **Maintenance guide: plate heat exchangers**. Lund, 2018. Available at: <https://www.alfalaval.com/>. Accessed: 2025-03-10.

AMERICAN NUCLEAR SOCIETY. **Nuclear safety criteria for the design of stationary pressurized water reactor plants**. La Grange Par: ANS, 1983.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia, administração e economia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006. ISBN 978-8535212001.

BARBOSA, B. C. M. **Cost reduction in CCMR maintenance activities without compromising safety**. 2024. Dissertation (Master of Science in the Graduate Program of Space Sciences and Technologies) – Institute Technological of Aeronautical, São José dos Campos, 2024.

BARBOSA, B. C. M.; SILVA, L. G. B.; ROCHA, G. C. Financial reduction of aircraft maintenance plan under safety and maintenance constraints. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM RELIABILITY AND SAFETY, 7., 2023, Bologna. **Proceeding** [...]. Piscataway: IEEE, 2023. p. 13–17.

BILLINTON, R.; EL-SHEIKHI, F. A. Preventive maintenance scheduling in power generation systems using a quantitative risk criterion. **Canadian Electrical Engineering Journal**, IEEE, v. 8, n. 1, p. 28–35, 1983.

BINGBING, H.; LIANG, Z.; YUNER, J. Candidate certification maintenance requirement analysis and certification practice. 2014. **Procedia Engineering**, v. 80, p. 17–25, 2014. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.09.055.

BLANCHARD, B. S. **System engineering management**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2004.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Empirical model-building and response surfaces**. New York: John Wiley and Sons, 1987. ISBN 978-0471810339.

DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions**. Princeton: Princeton University Press, 1963.

DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY (United States). **Life cycle cost (LCC)**. 2023. Fort Belvoir: DAU, 2023. Available at: <https://www.dau.edu/acquipedia-article/life-cycle-cost-lcc>. Accessed: 2025-03-05.

DENG, Y.; ZHENG, Y.; ZHANG, S.; WANG, W.; XIA, R. Development and application of a decision support system for maintenance package optimization under multi-constraint conditions. **Mathematics**, v. 11, n. 3, p. 606, 2023.

DESCHAMPS, P.; CATTEL, M. Maintenance interval definition for critical systems: Contributions. 2014. *In*: CONGRÈS DE MAÎTRISE DES RISQUES ET SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT - LAMBDA MU, 19., 2014, Dijon. **Proceedings** [...]. Dijon: IMDR, 2014. p. 180–193.

EBELING, C. **Reliability and Maintainability Engineering**. New York: McGraw-Hill, 2010.

EMERSON. Fisher high pressure valves with cavitrol III characterized trim reduce upgrade costs and extend maintenance time interval from 2 years to 4 years. 2021. Marshalltown: Emerson Automation Solutions, 2021. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/case-study-fisher-high-pressure-valves-cavitrol-iii-characterized-trim-reduce-upgrade-costs-by-140-000-usd-extend-maintenance-time-interval-from-2-years-to-4-years-en-7810590.pdf>. Accessed: 2025-04-17.

ERICSON, C. A. *et al.* **Hazard analysis techniques for system safety**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2015.

GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. Berlin: Springer Science and Business Media, 2003.

HAUGE, K. V. *et al.* **Common cause failures in safety instrumented systems: beta factor approach** [...]. 2016. Norway: SINTEF, 2016.

HVAC KNOW IT ALL. **Maintenance tips for cooling towers**. 2022. Available at: <https://www.hvacknowitall.com/>. Accessed: 2025-03-11.

HYDRAULIC INSTITUTE. **Standards for Pump Maintenance**. Parsippany, NJ, 2019. Available at: <https://www.pumps.org>. Accessed: 2025-03-14.

KELLY, D. L.; SIU, N. O. Handbook of parameter estimation for probabilistic risk assessment. 1998. [S.l.], 1998. Accessed:2025-06-11. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML0703/ML07380162.pdf>. <https://www.federalregister.gov/documents/2003/02/27/03-4624/handbook-of-parameter-estimation-for-probabilistic-risk-assessment-pra>.

KINNISON, H. A.; SIDDIQUI, T. **Aviation Maintenance Management**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2013. ISBN 9780071805025.

LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method for solving discrete programming problems. **Econometrica**, v. 28, n. 3, p. 497–520, 1960.

MATA FILHO, J. N. **An innovative method to solve the maintenance task allocation and packing problem**. 147 p. Thesis (Phd in Space Sciences and Technologies) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2024.

- MATA FILHO, J. N. ABRAHÃO, F. T. M. A study on maintenance task interval optimization by metaheuristics. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA*, 19., 2019, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, RJ: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.
- MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. South Norwalk: Industrial Press Inc., 2001.
- NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. Maintenance Guidelines for Electric Motors. 2020. Retrieved from NEMA.
- OREDA Reliability Data Handbook. 6th. ed. Trondheim: OREDA Participants, 2015. Offshore Reliability Data. ISBN 978-82-515-0819-1.
- PADBERG, M. W.; RINALDI, G. A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems. **SIAM Review**, v. 33, n. 1, p. 60–100, 1991.
- PETRONOTÍCIAS. **Eletronuclear rejeita fiscalização da WANO nas usinas Angra 1 e 2 e põe o Brasil ao lado do Irã e da Coreia do Norte**. 2025. Acesso em: 18 ago. 2025. Disponível em: <https://petronoticias.com.br/eletronuclear-rejeita-fiscalizacao-da-wano-nas-usinasangra-1-e-2-e-poe-o-brasil-ao-lado-do-ira-e-da-coreia-do-norte/>.
- PHAM, H. **Handbook of Reliability Engineering**. London: Springer, 2003. Covers reliability modeling, including discussions on the bathtub curve and random failures during component maturity. ISBN 978-1852334536.
- PUMPS; SYSTEMS. **Centrifugal pump maintenance best practices**. Birmingham: Pumps and Systems, 2018. Available at: <https://www.pumpsandsystems.com/>. Accessed: 2025-03-15.
- REASON, J. **Human error**. Cambridge: University Press, 1990.
- REDE ELÉTRICA NACIONAL (Lisboa). **Relatório de Qualidade de Serviço: subestações elétricas**. Lisboa: REN, 2022.
- ROCHA, G. C. **Fundamentos de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. Notas de Aula de TE-267.
- SI, Y.; LIU, X.; LIU, F.; MA, M.; ZHANG, Y. Research on combination optimization method of equipment preventive maintenance tasks based on generalized cost. *Processes*, MDPI, v. 11, n. 3, p. 850, 2023. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/3/850>.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Aerospace recommended practice 4761: Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment**. 1996. Warrendale, PA: SAE, 1996.
- TAO, W. Optimization method for candidate certification maintenance requirement on civil aircraft. **IET Conference Proceedings**, v. 2022, n.7, p. 1-4, 2022.

TEAM weOptimize. Multi-start simheuristic for project portfolio optimization, including project risk, operational interruptions, and project risk correlations. 2024. Accessed: 2025-02-05. Available at: https://github.com/weOptimize/PPSP_simheuristic_wCorrelat-Interrupt.

UCHIBORI, A.; DODA, N.; AOYAGI, M.; SONEHARA, M.; SOGABE, J.; OKANO, Y.; TAKATA, T.; TANAKA, M.; ENUMA, Y.; WAKAI, T.; ASAYAMA, T.; OHSHIMA, H. Numerical simulation technologies for safety evaluation in plant lifecycle optimization method, arkadia for advanced reactors. **Nuclear Engineering and Design**, v. 413, p. 112492, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112492>.

UNITED STATES. Department of Commerce. National Technical Information Service. Reliability Analysis Center. **FMD-91: failure mode/mechanism distributions**. Rome, NY: Reliability Analysis Center, 1991. Prepared for the Reliability Analysis Center by IIT Research Institute.

UNITED STATES. Department of Commerce. National Technical Information Service. Reliability Analysis Center. **NPRD-91: Non-Electronic Parts Reliability Data**. Rome, NY: Reliability Analysis Center, 1991. Prepared for the Reliability Analysis Center by IIT Research Institute. Available at: <https://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a241091.pdf>. Accessed: 2025-03-14.

UNITED STATES. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **Advisory Circular 25.1309-1: system design and analysis**. 1988. Washington, DC: FAA, 1988. Disponível em: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars. Accessed: 2024-12-12.

YADA, H.; TAKAYA, S.; MOROHOSHI, K.; YOKOI, S.; MIYAGAWA, T. Proposal for maintenance optimization scheme based on system based code concept. **Mechanical Engineering Journal**, v. 10, n. 4, p. 23-00044, 2023.

Apêndice A - Algoritmo de Otimização dos Intervalos CMR

Algoritmo 1: OTIMIZARINTERVALOSCMR()

Saída: Valores ótimos para EC_1 a EC_6 e vetor EC_j

1 $modelo \leftarrow LP(\text{Max})$;

2 $EC_1 \in [1, 720]$;

3 $EC_i \in [1, 360]$ para $i = 2$ até 6 ;

4 $modelo \leftarrow \text{maximizar } \sum_{i=1}^6 EC_i$;

5 $modelo \leftarrow modelo \cup$

$$\left\{ \begin{array}{l} 9.22 \cdot 10^{-13} \cdot EC_1 + 1.86 \cdot 10^{-11} \cdot EC_2 + 5.66 \cdot 10^{-10} \cdot EC_3 + \\ 3.86 \cdot 10^{-11} \cdot EC_4 + 1.32 \cdot 10^{-10} \cdot EC_5 + 8.79 \cdot 10^{-15} \cdot EC_6 \leq 1.1549 \cdot 10^{-6} \end{array} \right\}$$

6 **resolver** $modelo$;

7 $EC_i^* \leftarrow \text{valor}(EC_i)$, $i = 1, \dots, 6$;

8 $EC_j \leftarrow [EC_1^*, EC_1^*, EC_2^*, EC_2^*, \dots, EC_6^*, EC_6^*]$;

9 **retorno** $EC_1^*, \dots, EC_6^*, EC_j$

Apêndice B - Algoritmo da Programação Inteira para Elaboração de Calendário de Manutenção

Algoritmo 2: OTIMIZACAOCALENDARIOMANUTENCAO(D, ES_k, EC_j, Q, CD, FD) - Parte I

Entrada: $D, ES_k, EC_j, Q, QLL_l, CD, FD, CS_k, CC_j, CR_m, QS_k, QC_j, QR_m, LS_k, LC_j, LR_m, \text{per\u00edodos_bloqueados}$

Sa\u00edda: Lucro m\u00e1ximo e calend\u00e1rio de execu\u00e7\u00e3o das atividades

- 1 $X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm} \in \{0, 1\} \forall d \in [1, D] \forall k, j, m;$
 - 2 $A_d \in \{0, 1\};$
 - 3 $Fat \leftarrow \sum_{d=1}^D FD \cdot A_d$
 - 4 $C \leftarrow \sum_{d=1}^D \left(\sum_k X_{dk} \cdot CS_k + \sum_j Y_{dj} \cdot CC_j + \sum_m Z_{dm} \cdot CR_m + CD \cdot (1 - A_d) \right)$
 - 5 $\text{modelo} \leftarrow \text{maximizar } Fat - C ;$
 - 6 **para** $d \leftarrow 1$ **at\u00e9** D **fa\u00e7a**
 - 7 $\left[\begin{array}{l} Frac_d \leftarrow \frac{1}{T} \cdot \left(\sum_k X_{dk} + \sum_j Y_{dj} + \sum_m Z_{dm} \right); \\ A_d \leq 1 - Frac_d; \end{array} \right.$
 - 8 $\left[\begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right.$
 - 9 **para cada** $d \in \text{per\u00edodos_bloqueados}$ **fa\u00e7a**
 - 10 $\left[\begin{array}{l} \sum_k X_{dk} = 0; \\ \sum_j Y_{dj} = 0; \\ \sum_m Z_{dm} = 0; \end{array} \right.$
 - 11 $\left[\begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right.$
 - 12 $\left[\begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right.$
 - 13 **para cada** $k \in \text{AtvSk}$ **fa\u00e7a**
 - 14 $\left[\begin{array}{l} \text{para } d \leftarrow 1 \text{ at\u00e9 } D - ES_k \text{ fa\u00e7a} \\ \left[\begin{array}{l} \sum_{d'=d}^{d+ES_k} X_{d'k} \geq 1; \end{array} \right. \end{array} \right.$
 - 15 $\left[\begin{array}{l} \\ \end{array} \right.$
 - 16 $\left[\begin{array}{l} \text{para } d \leftarrow ES_k + 1 \text{ at\u00e9 } D \text{ fa\u00e7a} \\ \left[\begin{array}{l} X_{dk} \leq \sum_{d'=d-ES_k}^{d-1} X_{d'k}; \end{array} \right. \end{array} \right.$
 - 17 $\left[\begin{array}{l} \\ \end{array} \right.$
-

Algoritmo 3: OTIMIZACAOCALENDARIOMANUTENCAO(D, ES_k, EC_j, Q, CD, FD) - Parte II (continuação)

18 **para cada** $j \in AtvCj$ **faça**

19 **para** $d \leftarrow 1$ **até** $D - EC_j$ **faça**

20 $\sum_{d'=d}^{d+EC_j} Y_{dj} \geq 1$

21 **para** $d \leftarrow EC_j + 1$ **até** D **faça**

22 $Y_{dj} \leq \sum_{d'=d-EC_j}^{d-1} Y_{d'j}$

23 **para cada** $k \in AtvSk$ **faça**

24 $m \leftarrow$ índice de preparatória associada a k

25 **para** $d \leftarrow 1$ **até** D **faça**

26 $X_{dk} \leq \sum_{d'=\max(1,d-7)}^d Z_{d'm}$

27 **para cada** $j \in AtvCj$ **faça**

28 $m \leftarrow$ índice de preparatória associada a j

29 **para** $d \leftarrow 1$ **até** D **faça**

30 $Y_{dj} \leq \sum_{d'=\max(1,d-7)}^d Z_{d'm}$

31 **para** $d \leftarrow 1$ **até** D **faça**

32 $\sum_k X_{dk} \cdot QS_k + \sum_j Y_{dj} \cdot QC_j + \sum_m Z_{dm} \cdot QR_m \leq Q$

33 **para** $l \leftarrow 1$ **até** 4 **faça**

34 $\sum_{k \in L_l} X_{dk} \cdot QS_k + \sum_{j \in L_l} Y_{dj} \cdot QC_j + \sum_{m \in L_l} Z_{dm} \cdot QR_m \leq QLL_l$

35 $\frac{\sum_{d=1}^D A_d}{D} \geq \alpha$

36 **resolva** *modelo* (tolerância 4%)

37 $Lucro^* \leftarrow$ valor da função objetivo

38 **retorne** $Lucro^*$ e calendário de execução (X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})

Apêndice C - Algoritmo da Heurística de Elaboração de Calendário de Manutenção

Algoritmo 4: HERISTICAPLANJEMANTOMANUTENCAO($D, ES_k, EC_j, Q, QLL_l, CD, FD, CS_k, CC_j, CR_m, QS_k, QC_j, QR_m, LS_k, LC_j, LR_m,$ períodos_bloqueados, num_reinicios, num_iteracoes, penalizacao_p)

Entrada: $D, ES_k, EC_j, Q, QLL_l, CD, FD, CS_k, CC_j, CR_m, QS_k, QC_j, QR_m, LS_k, LC_j, LR_m,$ períodos_bloqueados, num_reinicios, num_iteracoes, penalizacao_p

Saída: Melhor lucro e melhor calendário (X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})

```
1  $Lucro^* \leftarrow -\infty;$ 
2 para  $r \leftarrow 1$  até  $num\_reinicios$  faça
3    $(X_{dk}, Y_{dj}) \leftarrow GERARSOLUCAOINICIAL();$ 
4    $Z_{dm} \leftarrow 0, \forall d, m;$ 
5    $Lucro_r \leftarrow AVALIARSOLUCAO(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm});$ 
6   para  $t \leftarrow 1$  até  $num\_iteracoes$  faça
7      $(X'_{dk}, Y'_{dj}, Z'_{dm}) \leftarrow PERTURBARSOLUCAO(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm});$ 
8      $Lucro' \leftarrow AVALIARSOLUCAO(X'_{dk}, Y'_{dj}, Z'_{dm});$ 
9     se  $Lucro' > Lucro_r$  então
10       $X_{dk} \leftarrow X'_{dk}, Y_{dj} \leftarrow Y'_{dj}, Z_{dm} \leftarrow Z'_{dm};$ 
11       $Lucro_r \leftarrow Lucro';$ 
12   se  $Lucro_r > Lucro^*$  então
13      $X_{dk}^*, Y_{dj}^*, Z_{dm}^* \leftarrow X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm};$ 
14      $Lucro^* \leftarrow Lucro_r;$ 
15 return  $Lucro^*, X_{dk}^*, Y_{dj}^*, Z_{dm}^*$ 
```

Algoritmo 5: GERARSOLUCAOINICIAL()

Saída: Solução inicial (X_{dk}, Y_{dj})

- 1 Inicializar $X_{dk} \leftarrow 0, \forall d, k;$
- 2 Inicializar $Y_{dj} \leftarrow 0, \forall d, j;$
- 3 **para** $k \leftarrow 1$ **até** $|AtvSk|$ **faça**
- 4 **para** $i \leftarrow 1$ **até** $\lfloor D/ES_k \rfloor$ **faça**
- 5 $d \leftarrow i \cdot ES_k;$
- 6 **enquanto** $d \in \text{períodos_bloqueados}$ **faça**
- 7 $d \leftarrow d - 1;$
- 8 **se** $d > D$ **então**
- 9 **se** $d \leq D$ **então**
- 10 $X_{dk} \leftarrow 1;$
- 11 **para** $j \leftarrow 1$ **até** $|AtvCj|$ **faça**
- 12 **para** $i \leftarrow 1$ **até** $\lfloor D/EC_j \rfloor$ **faça**
- 13 $d \leftarrow i \cdot EC_j;$
- 14 **enquanto** $d \in \text{períodos_bloqueados}$ **faça**
- 15 $d \leftarrow d - 1;$
- 16 **se** $d > D$ **então**
- 17 **se** $d \leq D$ **então**
- 18 $Y_{dj} \leftarrow 1;$
- 19 **retorne** X_{dk}, Y_{dj}

Algoritmo 6: AVALIARSOLUCAO(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})

Entrada: Calendário com atividades X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm}

Saída: Valor da função objetivo considerando penalizações

- 1 $c_{manut} \leftarrow \sum_{d,k} X_{dk} \cdot CS_k + \sum_{d,j} Y_{dj} \cdot CC_j + \sum_{d,m} Z_{dm} \cdot CR_m;$
- 2 $c_{indisp} \leftarrow \sum_d CD \cdot \mathbb{K}[(\sum_k X_{dk} + \sum_j Y_{dj} + \sum_m Z_{dm}) > 0];$
- 3 $f_{disp} \leftarrow \sum_d FD \cdot \mathbb{K}[(\sum_k X_{dk} + \sum_j Y_{dj} + \sum_m Z_{dm}) = 0];$
- 4 $pen_{int} \leftarrow \text{CALCULARPENALIZACAOINTERVALO}(X_{dk}, Y_{dj});$
- 5 $pen_{trab} \leftarrow \text{CALCULARPENALIZACAO TRABALHADORES}(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm});$
- 6 $pen_{local} \leftarrow \text{CALCULARPENALIZACAO POR LOCAL}(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm});$
- 7 $lucro \leftarrow f_{disp} - c_{manut} - c_{indisp} - pen_{int} - pen_{trab} - pen_{local};$
- 8 **retorne** $lucro$

Algoritmo 7: CALCULARPENALIZACAOINTERVALO(X_{dk}, Y_{dj})

Saída: Penalização total por violação de intervalos máximos

```

1 penint ← 0;
2 para cada  $k \in AtvSk$  faça
3   dias ← { $d : X_{dk} = 1$ };
4   se  $\nexists d \in [D - ES_k, D]$  tal que  $X_{dk} = 1$  então
5     penint ← penint + penalizacao_int;
6   para  $i \leftarrow 2$  até |dias| faça
7     se dias[ $i$ ] - dias[ $i - 1$ ] >  $ES_k$  então
8       penint ← penint + penalizacao_int;
9 para cada  $j \in AtvCj$  faça
10  dias ← { $d : Y_{dj} = 1$ };
11  se  $\nexists d \in [D - EC_j, D]$  tal que  $Y_{dj} = 1$  então
12    penint ← penint + penalizacao_int;
13  para  $i \leftarrow 2$  até |dias| faça
14    se dias[ $i$ ] - dias[ $i - 1$ ] >  $EC_j$  então
15      penint ← penint + penalizacao_int;
16 retorne penint

```

Algoritmo 8: CALCULARPENALIZACAO TRABALHADORES(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})

Saída: Penalização por violação da quantidade total de trabalhadores

```

1 pentrab ← 0;
2 para  $d \leftarrow 1$  até  $D$  faça
3   trab ←  $\sum_k X_{dk} \cdot QS_k + \sum_j Y_{dj} \cdot QC_j + \sum_m Z_{dm} \cdot QR_m$ ;
4   se trab >  $Q$  então
5     pentrab ← pentrab + penalizacao_trab;
6 retorne pentrab

```

Algoritmo 9: CALCULARPENALIZACAOPORLOCAL(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})

Saída: Penalização por violação do limite de trabalhadores por local

```

1  $pen_{local} \leftarrow 0;$ 
2 para  $d \leftarrow 1$  até  $D$  faça
3   para  $l \leftarrow 1$  até  $4$  faça
4      $trab_l \leftarrow \sum_{k \in L_l} X_{dk} \cdot QS_k + \sum_{j \in L_l} Y_{dj} \cdot QC_j + \sum_{m \in L_l} Z_{dm} \cdot QR_m;$ 
5     se  $trab_l > QLL_l$  então
6        $pen_{local} \leftarrow pen_{local} + penalizacao\_local;$ 
7 retorne  $pen_{local}$ 

```

Algoritmo 10: PERTURBAR SOLUCAO(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm}) - Parte I

Saída: Solução ajustada após perturbação e correções

```

1 para cada  $k \in AtvSk$  faça
2      $dias \leftarrow \{d : X_{dk} = 1\}$ ;
3     para  $i \leftarrow 2$  até  $|dias|$  faça
4         se  $dias[i] - dias[i - 1] > ES_k$  então
5              $novo\_d \leftarrow dias[i] - (dias[i] - dias[i - 1] - ES_k)$ ;
6              $X_{d_i,k} \leftarrow 0, X_{novo\_d,k} \leftarrow 1$ ;
7 para cada  $j \in AtvCj$  faça
8      $dias \leftarrow \{d : Y_{dj} = 1\}$ ;
9     para  $i \leftarrow 2$  até  $|dias|$  faça
10        se  $dias[i] - dias[i - 1] > EC_j$  então
11             $novo\_d \leftarrow dias[i] - (dias[i] - dias[i - 1] - EC_j)$ ;
12             $Y_{d_i,j} \leftarrow 0, Y_{novo\_d,j} \leftarrow 1$ ;
13  $violacao \leftarrow Verdadeiro$ ;
14 enquanto  $violacao$  faça
15      $violacao \leftarrow CORRIGIRVIOLACOESTRABTOTALLOCAL(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})$ ;
16 se  $violacao = Falso$  então
17      $\mathcal{A}_X \leftarrow \{(d, k) : X_{dk} = 1\}$ ;
18      $\mathcal{A}_Y \leftarrow \{(d, j) : Y_{dj} = 1\}$ ;
19      $\mathcal{A} \leftarrow \mathcal{A}_X \cup \mathcal{A}_Y$ ;
20      $\mathcal{A}_{pert} \leftarrow escolha\ aleatoriamente(\mathcal{A}, [0, 1 \cdot |\mathcal{A}|])$ ;
21     para cada  $(d, idx) \in \mathcal{A}_{pert}$  faça
22         se  $(d, idx) \in \mathcal{A}_X$  então
23              $X_{d,idx} \leftarrow 0$ ;
24         senão
25              $Y_{d,idx} \leftarrow 0$ ;
26          $\mathcal{J} \leftarrow \{d' \in [d - 5, d + 5] : 1 \leq d' \leq D \wedge d' \notin \text{períodos\_bloqueados}\}$ ;
27         se  $\mathcal{J} \neq \emptyset$  então
28              $d' \leftarrow random(\mathcal{J})$ ;
29             se  $(d, idx) \in \mathcal{A}_X$  então
30                  $X_{d',idx} \leftarrow 1$ ;
31             senão
32                  $Y_{d',idx} \leftarrow 1$ ;

```

Algoritmo 11: PERTURBAR SOLUCAO(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm}) - Parte II (continuação)

```

35 para cada  $k \in AtvSk$  faça
36   se  $\nexists d \in [D - ES_k, D]$  tal que  $X_{dk} = 1$  então
37      $d' \leftarrow$  escolha aleatoriamente ( $[D - ES_k, D]$ )
38      $X_{d'k} \leftarrow 1$ 

39 para cada  $j \in AtvCj$  faça
40   se  $\nexists d \in [D - EC_j, D]$  tal que  $Y_{dj} = 1$  então
41      $d' \leftarrow$  escolha aleatoriamente ( $[D - EC_j, D]$ )
42      $Y_{d'j} \leftarrow 1$ 

43  $X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm} \leftarrow$  INSERIR ATIVIDADES PREPARATORIAS( $X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm}$ )
44 retorne  $X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm}$ 

```

Algoritmo 12: INSERIR ATIVIDADES PREPARATORIAS(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})

Saída: Calendário ajustado com inserções e remoções de atividades preparatórias

```

1 para  $d \leftarrow 1$  até  $D$  faça
2    $A \leftarrow \{(k, LSk[k]) : X_{dk} = 1\} \cup \{(j, LC_j[j]) : Y_{dj} = 1\}$ ;
3   para cada  $(i, l) \in A$  faça
4      $m \leftarrow$  índice tal que  $LR_m[m] = l$ ;
5     se  $\sum_{d'=\max(1, d-7)}^{\min(D, d+7)} Z_{d'm} = 0$  então
6        $Z_{dm} \leftarrow 1$ ;

7 para  $d \leftarrow 1$  até  $D$  faça
8   para  $m \leftarrow 1$  até  $|AtvRm|$  faça
9     se  $Z_{dm} = 1$  então
10      se  $\sum_{d'=\max(1, d-7)}^{\min(D, d+7)} (\sum_k X_{d'k} + \sum_j Y_{d'j}) = 0$  então
11         $Z_{dm} \leftarrow 0$ ;

12 retorne  $X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm}$ 

```

Algoritmo 13: CORRIGIRVIOLACOESTRABTOTALLOCAL(X_{dk}, Y_{dj}, Z_{dm})

Saída: Indica se houve alguma correção realizada

```

1 violacao ← Falso;
2 para d ← 1 até D faça
3   para cada l ∈ {L1, L2, L3, L4} faça
4     trab_loc[l] ← ∑k:LSk=l Xdk · QSk +
5     ∑j:LCj=l Ydj · QCj + ∑m:LRm=l Zdm · QRm;
6   trab_total ← ∑l trab_loc[l];
7   se trab_total > Q então
8     violacao ← Verdadeiro;
9     (i, t) ← escolha aleatoriamente(
10      {(k, X) : Xdk = 1} ∪ {(j, Y) : Ydj = 1} ∪ {(m, Z) : Zdm = 1});
11     tdi ← 0;
12     d' ← max(1, d - 1) tal que d' ∉ períodos bloqueados;
13     td'i ← 1;
14   para cada l ∈ {L1, L2, L3, L4} faça
15     se trab_loc[l] > QLLl então
16       violacao ← Verdadeiro;
17       (i, t) ← escolha aleatoriamente(
18        {(k, X) : Xdk = 1 ∧ LSk = l} ∪
19        {(j, Y) : Ydj = 1 ∧ LCj = l} ∪
20        {(m, Z) : Zdm = 1 ∧ LRm = l});
21       tdi ← 0;
22       d' ← max(1, d - 1) tal que d' ∉ períodos bloqueados;
23       td'i ← 1;
23 retorne violacao

```

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DM	2. DATA 12 de agosto 2025	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/DM-059/2025	4. Nº DE PÁGINAS 104
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Otimização da manutenção planejada de sistemas críticos sujeitos a restrições de segurança e operacionais			
6. AUTOR(ES): Paulo Allan Hamasaki			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Otimização de plano de manutenção; Alocação de tarefas; CCMR; Heurística; Falha latente			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Reatores nucleares; Manutenção; Árvores de falhas; Otimização; Sistemas de segurança; Ciclo de vida; Engenharia aeronáutica			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Espaciais. Área de Gestão Tecnológica. Orientador: Prof. Dr. Guilherme Conceição Rocha. Defesa em 12/08/2025. Publicada em 2025.			
11. RESUMO: Este trabalho apresenta uma metodologia para otimização do plano de manutenção de sistemas críticos sujeitos a requisitos de segurança e certificação, com aplicação ao sistema de resfriamento no cais de apoio a um reator nuclear embarcado. Embora instalado em terra, esse sistema integra a cadeia de segurança do reator sempre que o submarino está atracado, sendo, portanto, submetido às normas e diretrizes regulatórias do setor nuclear. A metodologia proposta concilia análise de segurança e restrições operacionais, com o objetivo de construir um calendário de manutenção que maximize a produtividade do sistema ao longo de seu ciclo de vida. A abordagem é estruturada em cinco etapas, a saber: a primeira corresponde à análise de segurança, com base na modelagem da árvore de falhas do sistema; a segunda, à etapa de otimização dos intervalos dos Certification Maintenance Requirements (CMR); a terceira, à análise de restrições operacionais; a quarta contempla a determinação de um calendário de manutenção preliminar; e, por fim, a quinta etapa é a consolidação do calendário de manutenção discretizado. A construção do plano de manutenção é executada por duas abordagens, uma utilizando programação inteira e outra por uma heurística desenvolvida neste estudo a fim de expandir as análises para horizontes temporais mais extensos. Os resultados obtidos demonstram que o método proposto é capaz de integrar diferentes domínios de análise para elaborar planos de manutenção otimizados, viáveis e consistentes com os requisitos normativos e operacionais impostos a sistemas críticos com exigência de confiabilidade.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			