



DIRETRIZES PARA O MONITORAMENTO DA EFICÁCIA DA MANUTENÇÃO  
DE ITENS IMPORTANTES À SEGURANÇA PARA O SUBMARINO DE  
PROPULSÃO NUCLEAR BRASILEIRO

Rubens Alberto de Oliveira Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Nuclear, COPPE, da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Nuclear.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira  
Frutuoso e Melo

Rio de Janeiro  
Março de 2018

DIRETRIZES PARA O MONITORAMENTO DA EFICÁCIA DA MANUTENÇÃO  
DE ITENS IMPORTANTES À SEGURANÇA PARA O SUBMARINO DE  
PROPULSÃO NUCLEAR BRASILEIRO

Rubens Alberto de Oliveira Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

---

Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

---

Prof. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Oliveira Filho, Rubens Alberto de

Diretrizes para o Monitoramento da Eficácia da Manutenção de Itens Importantes à Segurança para o Submarino de Propulsão Nuclear Brasileiro / Rubens Alberto de Oliveira Filho – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 136 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo  
Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 125-131.

1. Regra da Manutenção. 2. Submarino Nuclear. 3. Monitoramento da Eficácia da Manutenção. 4. Análise de Segurança. I. Melo, Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Dedico este trabalho a Deus, pela sua maravilhosa graça, a Ele toda honra, toda glória e todo louvor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao almirante dos almirantes, ao general dos generais, o Senhor Jesus Cristo, que morreu numa cruz pelos meus pecados, e ao terceiro dia ressuscitou. Bravo Zulu.

À minha esposa e eterna namorada Caroline pelo apoio, carinho e incentivo, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo e pai Rubens Alberto por todo apoio e incentivo, fundamentais para a formação da minha carreira.

À minha querida mãe Mariazinha por ter me ensinado a caminhar e confiar no Deus todo poderoso.

À Marinha do Brasil pelo apoio financeiro e pela oportunidade de participar do desenvolvimento de um sistema de alta tecnologia.

Ao Contra-Almirante (EN) Guilherme Dionizio Alves por permitir a continuidade deste trabalho e contribuir com a minha formação acadêmica.

Ao Capitão-de-Mar-e-Guerra (RM1) Yran Leite Maia por todo apoio, incentivo, e, sobretudo, pelos novos desafios na minha carreira naval.

Ao Capitão-de-Mar-e-Guerra (RM1) Sergio Mauricio Tavares do Amparo e ao Capitão-de-Corveta Luiz Carlos Enes de Oliveira Junior pelo apoio, incentivo e ensinamentos fundamentais para minha formação militar.

Ao Eng. Olívio Napolitano, ao Eng. Bruno Pinho, e à Eletronuclear, especialmente aos amigos do PMEM, Ronaldo Cardoso, Valéria Simões e Sergio por contribuírem para a realização deste trabalho.

Ao Professor Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo pelas orientações, paciência e pela excelência com a qual realiza suas atividades, prestando relevantes serviços ao país, e aos membros da banca Professor Carlos André Vaz Junior e Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha pelas orientações e disponibilidade.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

DIRETRIZES PARA O MONITORAMENTO DA EFICÁCIA DA MANUTENÇÃO  
DE ITENS IMPORTANTES À SEGURANÇA PARA O SUBMARINO DE  
PROPULSÃO NUCLEAR BRASILEIRO

Rubens Alberto de Oliveira Filho

Março/2018

Orientador: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho apresenta um conjunto de orientações para o planejamento do monitoramento da eficácia da manutenção nas fases de *design* (concepção, desenvolvimento e produção) de um submarino nuclear e do seu sistema de apoio. Essas orientações visam a produção de informações necessárias para a implantação de um programa de monitoramento da eficácia da manutenção de um submarino nuclear e seu sistema de apoio durante as fases de operação e apoio do seu ciclo de vida. Para sustentar as orientações sugeridas foram apresentadas as principais características do ciclo de vida de um sistema, com a definição de fases, principais atividades e processos. Como sugestão de vetor de aplicação das orientações propostas foi apresentada a metodologia de apoio logístico integrado, privilegiando uma abordagem sistêmica para o planejamento do monitoramento da eficácia da manutenção do conjunto submarino nuclear e seu sistema de apoio. As principais características de um submarino nuclear que influenciam as atividades de monitoramento da eficácia da manutenção foram consideradas nas orientações propostas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

GUIDELINES FOR MONITORING THE EFFECTIVENESS OF MAINTENANCE  
OF IMPORTANT SAFETY ITEMS FOR THE BRAZILIAN NUCLEAR POWERED  
SUBMARINE

Rubens Alberto de Oliveira Filho

March/2018

Advisor: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo

Department: Nuclear Engineering

This work presents a set of guidelines for planning maintenance effectiveness monitoring in the design, development and production phases of a nuclear submarine and its support system. These guidelines aim to produce information necessary for the implementation of a program to monitor the effectiveness of the maintenance of a nuclear submarine and its support system during the phases of operation and support of its life cycle. To support the suggested guidelines, the main characteristics of the life cycle of a system were presented, with the definition of phases, main activities and processes. As a suggestion for the application of the proposed guidelines, the methodology of integrated logistic support was presented, favoring a systemic approach to the planning of the monitoring of the effectiveness of the maintenance of the nuclear submarine set and its support system. The main characteristics of a nuclear submarine that influence the maintenance effectiveness monitoring activities were considered in the proposed guidelines.

## Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABELAS .....	xiii
ÍNDICE DE ABREVIACÕES .....	xv
Capítulo 1 - Introdução .....	1
1.1 Escopo do trabalho .....	2
1.2 Modelo de monitoramento .....	4
1.3 Metodologia de desenvolvimento .....	4
1.4 Justificativa para apresentação da metodologia de ALI .....	6
1.5 Organização do trabalho.....	8
Capítulo 2 - Regra da Manutenção.....	9
2.1 Regra da Manutenção nos EUA .....	9
2.2 Regra da Manutenção no Brasil .....	12
Capítulo 3 - Ciclo de Vida de Sistemas.....	16
3.1 Conceito de Sistema .....	16
3.2 Sistema de Interesse utilizado neste trabalho .....	21
3.3 Fases do ciclo de vida de sistemas .....	21
3.4 Modelo de ciclo de vida de sistemas de defesa .....	30
3.5 Processos do ciclo de vida de sistemas de defesa .....	34
3.6 Principais marcos do ciclo de vida de sistemas de defesa.....	41
Capítulo 4 - Apoio Logístico Integrado .....	46
4.1 Breve Histórico .....	46
4.2 Definição de Apoio Logístico Integrado .....	47
4.3 Processo de Engenharia de Sistemas.....	49
4.4 Processo de Apoio Logístico Integrado.....	51
4.5 Produtos Logísticos .....	64
4.6 Banco de Dados de Apoio Logístico (BDAL) e Atributos Logísticos .....	65
4.7 Produtos Logísticos relacionados com o MEM .....	67
Capítulo 5 - Submarino de Propulsão Nuclear .....	71
5.1 Plataforma Submarino Convencional.....	71
5.2 Plataforma Submarino Nuclear .....	74
5.3 Perfil de utilização de um submarino nuclear .....	76
5.4 Locais de operação de um submarino nuclear: mar, cais ou dique .....	79
5.5 Limitação de espaço dentro do submarino .....	83
Capítulo 6 – Diretrizes para o Monitoramento da Eficácia da Manutenção para o submarino nuclear .....	87



6.1	Requisitos de alto nível para a realização do MEM.....	87
6.2	Etapas de planejamento do MEM nas fases de design do submarino nuclear .....	93
6.3	Identificação de todas as ESC do conjunto submarino e sistema de apoio .....	95
6.4	Orientações para a identificação e definição das ESC do SN-BR.....	98
6.5	Seleção das ESC e identificação de funções no escopo do MEM.....	99
6.6	Orientações para a definição de ESC e funções no escopo de MEM do SN-BR .....	103
6.7	Determinação de ESC significativos para o risco para o submarino.....	105
6.8	Orientações para a identificação de ESC significativas para o risco no SN-BR.....	108
6.9	Determinação de funções e trechos funcionais no desenvolvimento de sistemas.....	110
6.10	Orientações para a definição de trechos funcionais e grupos de confiabilidade para o SN-BR.....	113
6.11	Determinação dos critérios de desempenho de ESC no escopo do MEM .....	115
6.12	Orientações para a definição de critérios de desempenho para o SN-BR .....	119
6.13	Avaliação periódica do MEM para o submarino nuclear.....	121
6.14	Gestão das atividades de manutenções que impactam a segurança nuclear.....	122
Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações .....		123
Referências Bibliográficas .....		125
Apêndice A – Tópicos para o Conceito Operacional (OpsCon) .....		132
Apêndice B – Elementos Logísticos e seus objetivos .....		134

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Fases do Ciclo de Vida de sistemas apresentadas pela ISO 15288 [5]	2
Figura 2	Metodologia de desenvolvimento do trabalho	6
Figura 3	Geração de produtos logísticos relacionados com o monitoramento da eficácia da manutenção	6
Figura 4	Área de aplicação do ALI no ToT entre Brasil e França para o submarino nuclear	7
Figura 5	Relação entre eficácia da manutenção, desempenho de ESC críticos e segurança da planta	10
Figura 6	Definição e avaliação prévia de requisitos e métricas de desempenho antes da entrada em operação do submarino	14
Figura 7	Representação da constituição de um sistema conforme BLANCHARD [18]	17
Figura 8	Representação da constituição de um sistema.	19
Figura 9	Exemplos de elementos de sistemas que constituem um sistema de defesa	19
Figura 10	Representação de um sistema que tem na sua arquitetura outros sistemas	19
Figura 11	Representação de sistemas de apoio (1, 2 e 3) de um sistema de defesa	20
Figura 12	Representação de elementos de apoio de um sistema de apoio	21
Figura 13	Representação do sistema de interesse desse trabalho	22
Figura 14	Comparação entre o ciclo de vida de um ser humano e o ciclo de vida de um sistema qualquer	22
Figura 15	Ilustração da relação entre conceitos de ciclo de vida (operacional, manutenção e apoio logístico) e CONOPS	30
Figura 16	Elaboração dos requisitos de sistema durante a fase de concepção a partir dos conceitos relacionados ao CV (operacional, manutenção, apoio logístico, etc.)	30
Figura 17	Exemplos de modelos de CV. (a) modelo de CV sequencial. (b) modelo de CV com desenvolvimento e produção incremental. (c) modelo de CV típico para sistema de alta complexidade	31
Figura 18	Montagem eletromecânica do LABGENE em Iperó-SP (lado esquerdo da fig.) e entrega pela empresa NUCLEP do vaso de pressão do reator e do gerador de vapor do LABGENE (lado direito da fig.).	32
Figura 19	Prédio principal e elevador de submarinos do estaleiro de construção do SN-BR em Itaguaí-RJ. (a) entrega do elevador de submarinos em dezembro de 2017. (b) concepção artística do local.	32
Figura 20	Fases do CV visualizada como um possível estado para o sistema de interesse	33
Figura 21	Tempo de duração de uma fase do CV de sistema	34
Figura 22	Processos do ciclo de vida de sistemas	36

Figura 23	Áreas institucionais relacionadas com os processos organizacionais capacitadores de projetos	37
Figura 24	Ilustração da criação ou adaptação de novos processos tomando como referência o processo de medição. Na área de qualidade o processo de referência dá origem a processos que podem ser utilizados em contextos diferentes	39
Figura 25	Relacionamento dos grupos de processos da ISO/IEC/IEEE 15288 para realizar a gestão do ciclo de vida de sistemas (ativos)	41
Figura 26	Ilustração dos principais marcos de transição e revisões técnicas dos programas de defesa da OTAN e da NASA	42
Figura 27	Integração de disciplinas de engenharia	48
Figura 28	Etapas do Processo de Engenharia de Sistemas para as fases de concepção, desenvolvimento e produção utilizado com referência por Blanchard [18]	49
Figura 29	Processo de Engenharia de Sistemas realizado durante as fases de concepção, desenvolvimento e produção	51
Figura 30	Objetivos de suportabilidade por fases do CV realizados pelo processo de ALI	54
Figura 31	Tarefas do processo de ALI por fases do CV.	55
Figura 32	Submarino Timbira (convencional, classe tupi) docado na Base Naval do Rio de Janeiro (março/2009).	59
Figura 33	Motor elétrico principal de um submarino convencional construído pela empresa Navantia.	59
Figura 34	Exemplos de recursos logísticos relacionados com a operação e com a manutenção de um submarino nuclear	62
Figura 35	Ilustração dos 12 elementos logísticos apontados pela Universidade de Aquisição de Defesa [44]	64
Figura 36	Ilustração de uma possível organização de atributos logísticos e respectivos valores logísticos dentro de um BDAL	66
Figura 37	Ilustração da extração de dados do BDAL em forma de relatório para fins específicos	67
Figura 38	Ilustração da definição de produtos logísticos relacionados ao MEM do submarino nuclear durante as fases de design	70
Figura 39	Representação do submarino de Bushnell (Turtle)	71
Figura 40	Concepção artística do submarino de David Bushnell.	72
Figura 41	Concepção artística do submarino convencional (S-34) Tikuna.	72
Figura 42	Ilustração do sistema de propulsão diesel-elétrica de um submarino convencional	73
Figura 43	Concepção artística do primeiro submarino brasileiro com propulsão nuclear (SN-BR)	75

Figura 44	Ilustração do sistema de propulsão nuclear do SN-BR.	75
Figura 45	Exemplo de um perfil de utilização de um submarino nuclear ao longo de sua vida útil	77
Figura 46	Perfil de utilização para o SN-BR com troca de combustível a cada 5 anos (máximo)	78
Figura 47	Disposição dos equipamentos dentro de um submarino convencional, HMS Ocelot	84
Figura 48	Matriz de impacto de manutenção em sistemas de segurança	85
Figura 49	Modelo em escala reduzida do SN-BR	85
Figura 50	Requisitos de Alto Nível relacionados ao MEM	88
Figura 51	Requisitos de suportabilidade influenciando o submarino e seus sistemas de apoio	89
Figura 52	Alocação de requisitos de suportabilidade nos diversos níveis da arquitetura do submarino nuclear	91
Figura 53	Diagrama lógico de implantação da RM	94
Figura 54	Exemplo de uma arquitetura que identifica as ESC nos níveis: sistemas, subsistemas, equipamentos e componentes	95
Figura 55	Exemplo de desdobramento funcional da arquitetura do submarino	95
Figura 56	Elementos de arquitetura desempenhando uma ou mais funções. As funções podem ser de natureza diferentes.	100
Figura 57	Exemplo de formulário para identificação de ESC no escopo do PMEM	101
Figura 58	Ilustração da alocação de requisitos de desempenho na síntese de ESC do SN-BR.	120

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Requisitos para o monitoramento da eficácia da manutenção [8]	9
Tabela 2	Exemplos de foco de avaliação para o programa de manutenção exigido pela CNEN [3]	13
Tabela 3	Conceito de sistema para diferentes áreas de aplicação [18]	17
Tabela 4	Exemplo de fase do ser humano e fase de um sistema de defesa	23
Tabela 5	Processamento de entradas e geração de produtos nas fases do CV	23
Tabela 6	Exemplos de subfases no ciclo de vida de um ser humano e de um sistema.	24
Tabela 7	Exemplo de transição de fases no ciclo de vida de um sistema	24
Tabela 8	Exemplos de propósitos para a fase de concepção	25
Tabela 9	Exemplos de propósitos para a fase de desenvolvimento	25
Tabela 10	Exemplos de propósitos para a fase de produção	25
Tabela 11	Exemplos de propósitos para as fases de operação e apoio	26
Tabela 12	Exemplos de propósitos para a fase de desfazimento	26
Tabela 13	Exemplo da utilização de CONOPS e OpsCon	28
Tabela 14	Exemplo de processo criado tomando como referência a ISO/IEC/IEEE 15288:2015[5].	40
Tabela 15	Termos utilizados para se referir ao ALI e ao processo de ALI	52
Tabela 16	Tarefas do processo de ALI.	53
Tabela 17	Exemplos de elementos de arquitetura que podem ser considerados em análises comparativas de suportabilidade para um submarino nuclear.	58
Tabela 18	Exemplo de requisitos funcionais de operação, de manutenção e de apoio logístico para o painel de controle do MEP	60
Tabela 19	Exemplo de requisitos funcionais de operação, de manutenção e de apoio logístico para uma instalação propulsora nuclear de um submarino nuclear	61
Tabela 20	Exemplo de análise comparativa de custo entre as possíveis soluções para operação, manutenção e apoio logístico do painel de controle do MEP	61
Tabela 21	Exemplos de produtos logísticos relacionados ao MEM	68
Tabela 22	Exemplo de definição para o processo que realiza o MEM	69
Tabela 23	Principais características de um submarino convencional de propulsão diesel-elétrica.	73
Tabela 24	Principais características do submarino nuclear brasileiro (SN-BR)	74
Tabela 25	Principais sistemas de um submarino com propulsão nuclear	76

Tabela 26	Exemplos de configuração operacional para um submarino nuclear	79
Tabela 27	Carregamentos e necessidades intrínsecos a presença e ao funcionamento de uma IPN dentro de um submarino nuclear.	80
Tabela 28	Carregamentos e necessidades impostos ao sistema de apoio de um submarino nuclear decorrentes da presença de uma IPN no seu interior.	81
Tabela 29	Exemplo de configuração operacional do submarino nuclear funcionando como usina fixa, móvel e móvel-fixa	82
Tabela 30	Exemplos de requisitos de suportabilidade relacionados ao MEM	90
Tabela 31	Quantidade total de ESC de nove usinas nucleares comerciais dos EUA	97
Tabela 32	Exemplos de atributos logísticos associados com a classe de segurança de ESC do SN-BR	99
Tabela 33	ESC não considerados no escopo de monitoramento e posicionamento da NRC	102
Tabela 34	Exemplos de atributos logísticos relacionados a funções desempenhadas por ESC	105
Tabela 35	Níveis de quantificação do risco de APS de centrais nucleares.	106
Tabela 36	Principais atividades realizadas nas fases de design relacionadas com a síntese de sistemas	112
Tabela 37	Exemplos de atributos logísticos relacionados com trechos funcionais e grupos de confiabilidade	115
Tabela 38	Exemplos de critérios de desempenho para ESC de um submarino nuclear	116
Tabela 39	Critérios de desempenho para ESC no escopo de monitoramento	118
Tabela 40	Objetivo e principais produtos logísticos relacionados aos elementos Apoio Integrado ao Produto (elementos logísticos).	134

## ÍNDICE DE ABREVIACÕES

AAL	Análise de Apoio Logístico
ALI	Apoio Logístico Integrado
AgNSNQ	Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade
AIP	Apoio Integrado ao Produto
APS	Análise Probabilística de Segurança
BDAL	Banco de Dados de Apoio Logístico
CCPWR	Close Coupled Pressurized Water Reactor
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONOPS	Concept of Operations
CV	Ciclo de Vida
DOD	Departamento de Defesa dos EUA
END	Estratégia Nacional de Defesa
ESC	Estrutura, sistema, componente, peça ou material.
FRACAS	Sistema de registro de falhas, análise e ações corretivas
FDN	Frequência de Dano ao Núcleo
IPWR	Integrated Pressurized Water Reactor
INCOSE	International Council on Systems Engineering
MB	Marinha do Brasil
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MEM	Monitoramento da Eficácia da Manutenção
NRC	Órgão regulador nuclear norte americano.
OpsCon	Operational Concept
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PAEMB	Plano de Articulação e Equipamento da Marinha do Brasil
PBC	Planejamento Baseado em Capacidades.
PMEM	Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção
POE	Procedimento Operacional de Emergência
PHST	Empacotamento, Manuseio, Armazenamento e Transporte
PWR	Pressurized Water Reactor
RM	Regra da Manutenção
RIR	Taxa de Incremento ao Risco
RRR	Taxa de Redução ao Risco
SN-BR	Submarino brasileiro com propulsão nuclear
ToT	Transferência de Tecnologia

## Capítulo 1 - Introdução

A Marinha do Brasil, em atendimento à Estratégia Nacional de Defesa (END), prevê no seu Plano de Articulação e Equipamento (PAEMB) a construção do primeiro submarino com propulsão nuclear<sup>1</sup> brasileiro, SN-BR, para 2018 [1]. O PAEMB [2] prevê ainda a construção de mais cinco SN-BR a partir de 2030, considerando os testes do primeiro SN-BR.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), órgão regulador nuclear brasileiro, determina [3] que a organização operadora deve estabelecer um programa de análise, auditoria e inspeção de manutenção, a fim de assegurar que o programa de manutenção seja implantado de acordo com o projeto, códigos e normas reguladoras e seus próprios procedimentos.

Determina, ainda, que [4] deverá ser considerado o impacto total no risco, quantificado através de modelo para gerenciamento do risco, nas tomadas de decisão envolvendo, entre outras, as seguintes atividades: modificação de projeto, gerenciamento de configuração de sistemas, planejamento da manutenção, testes periódicos, e análise de eventos operacionais.

A CNEN gerencia o processo de licenciamento de usinas nucleoeletricas fixas. Embora o submarino com propulsão nuclear não seja tecnicamente uma usina nucleoeletrica<sup>2</sup> fixa, há um entendimento entre CNEN e MB para o gerenciamento do processo de licenciamento do projeto como um todo (submarino, estaleiro e base naval) até o estabelecimento de um conjunto normativo específico.

O estabelecimento de um programa de análise, auditoria e inspeção de manutenção, bem como a consideração do impacto total do risco envolvido, são ações que devem estar em plena execução por ocasião da entrada em operação da usina (ou, nesse caso, do submarino), demandando, portanto, ações de planejamento durante as fases de projeto.

---

<sup>1</sup> Ou simplesmente “submarino nuclear”.

<sup>2</sup> Será usado no contexto deste trabalho simplesmente “usina”, conforme definição da CNEN 1.21 [2].



Este trabalho tem o objetivo de propor orientações que podem auxiliar a tomada de ações pela MB, durante as fases de projeto de submarinos com propulsão nuclear, visando o estabelecimento de um programa de monitoramento da eficácia da manutenção.

Cabe ressaltar que as fases de projeto ocorrem antes da entrada em operação do submarino. Mais especificamente, são todas as tarefas e ações que ocorrem nas fases de concepção, desenvolvimento e produção. Entende-se neste trabalho que o escopo e contexto das fases de concepção, desenvolvimento e produção são conforme os apresentados pela norma ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5] que apresenta e discute os processos do ciclo de vida de sistemas. Esta norma propõe que o ciclo de vida de sistemas seja organizado pelas fases de concepção, desenvolvimento, produção, operação, apoio e desfazimento, conforme mostrado na Figura 1.

CONCEPÇÃO	DESENVOLVIMENTO	PRODUÇÃO	OPERAÇÃO	APOIO	DESFAZIMENTO
Fases de Projeto (“ <i>design</i> ”)			Vida útil do sistema		Fim do ciclo de vida
Fases do <b>Ciclo de Vida</b> de Sistemas					

**Figura 1:** Fases do Ciclo de Vida de sistemas apresentadas pela ISO 15288 [5]

Na fase de apoio são realizadas no sistema ações de manutenção e de apoio logístico planejados nas fases de projeto (*design*<sup>3</sup>) (Figura 1). Já na fase de desfazimento são realizadas ações para desativar o sistema e seu sistema de apoio conforme planejamento definido nas fases precedentes do ciclo de vida.

### 1.1 Escopo do trabalho

A determinação da CNEN [3] para o estabelecimento de um programa de análise, auditoria e inspeção de manutenção, a fim de assegurar que o mesmo seja implantado de acordo com o projeto, códigos e normas reguladoras e seus próprios procedimentos restringe-se à itens importantes à segurança.

No seu normativo, a CNEN define que um item importante à segurança é qualquer estrutura, sistema, componente, peça ou material, que inclui ou está incluído em:

<sup>3</sup> Conforme a definição de “*design*” proposta pela ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5].

a) estruturas, sistemas e componentes cuja falha ou mau funcionamento pode resultar em exposições indevidas à radiação para o pessoal da usina ou membros do público em geral;

b) estruturas, sistemas e componentes que evitam que ocorrências operacionais previstas resultem em condições de acidente;

c) dispositivos ou características necessárias para atenuar as consequências de falha ou mau funcionamento de estruturas, sistemas e componentes importantes à segurança.

O projeto de um submarino nuclear, bem como de uma usina fixa, é concebido a partir da definição e desdobramento de requisitos. A definição e desdobramento de requisitos<sup>4</sup> é uma tarefa extensa por envolver requisitos de classes diferentes, dentre os quais citamos, por exemplo: requisitos técnicos e de gestão.

O presente trabalho se limitará à discussão de questões que envolvam requisitos operacionais, de manutenção e de apoio logístico que devem ser considerados durante as fases de concepção, desenvolvimento e produção<sup>5</sup> do submarino de propulsão nuclear necessários para o monitoramento da eficácia da manutenção de itens importantes à segurança. Tal monitoramento propriamente dito só será executado durante as fases de operação e apoio do ciclo de vida do submarino.

As ideias aqui apresentadas darão origem a discussões e orientações que, caso convier, poderão auxiliar a organização operadora do submarino nuclear (nesse caso, a Marinha do Brasil) a estabelecer antes da fase de operação uma estrutura de manutenção que viabilize o monitoramento da eficácia da manutenção, conforme preconizado no item 4.2.4 da CNEN 1.21 [3].

Algumas definições para a palavra “diretrizes” propõem o entendimento de orientações, instruções ou indicações:

“Diretrizes são orientações, guias, rumos. São linhas que definem e regulam um traçado ou um caminho a seguir.” [6]

---

<sup>4</sup> Os requisitos são decorrentes, por exemplo, de(o): normas; códigos; leis; cliente (dono do projeto).

<sup>5</sup> A construção é uma das tarefas executadas dentro da fase de produção do ciclo de vida de um submarino nuclear.

“[...] indicação ou instruções que serve de orientação.” [7]

Considerando o entendimento da palavra “diretrizes” como sendo o apresentado acima e a definição de “itens importantes à segurança” definido pela CNEN, adotou-se para este trabalho o seguinte título: “DIRETRIZES PARA O MONITORAMENTO DA EFICÁCIA DA MANUTENÇÃO DE ITENS IMPORTANTES À SEGURANÇA PARA O SUBMARINO DE PROPULSÃO NUCLEAR BRASILEIRO”. Portanto, as ideias, discussões e orientações apresentadas neste trabalho são de natureza propositiva, excluindo-se, deste modo, qualquer natureza normativa.

## **1.2 Modelo de monitoramento**

No seu normativo a CNEN não apresenta, nem exclui, um modelo para o monitoramento da eficácia da manutenção, entretanto, incentiva que a organização operadora colete informações suficientes e oportunas sobre as necessidades de manutenção, obtidas de projetistas, fabricantes, e, sobretudo, da experiência de organizações operadoras de outras usinas. Nesse sentido, este trabalho irá focar as discussões e orientações com base no modelo de monitoramento da eficácia da manutenção adotado pelas usinas norte-americanas, fundamentado no requisito normativo conhecido como Regra da Manutenção (RM) [8], que será apresentado no Capítulo 2.

O modelo norte-americano de monitoramento da eficácia da manutenção foi escolhido como referência pela disponibilidade de acesso à guia de implantação da RM [9], bem como acesso a relatórios de retorno de experiência na implementação da RM por usinas dos EUA [10] [11]. Soma-se ainda a isso que os requisitos da RM também foram utilizados como referência pela ELETRONUCLEAR [12] no modelo de monitoramento adotado pela usina nuclear Angra 2, o Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção – PMEM, o que pode contribuir futuramente para um possível compartilhamento de experiências para o caso do submarino nuclear.

## **1.3 Metodologia de desenvolvimento**

O desenvolvimento do trabalho apresenta orientações que visam viabilizar o monitoramento da eficácia da manutenção. Tais orientações são decorrentes da observação direta: de requisitos normativos da RM [8]; do guia de aplicação dos requisitos da RM [9]

pela indústria; de relatórios de lições aprendidas da aplicação dos requisitos da RM por usinas norte-americanas [10][11]; e, da experiência de implementação dos requisitos da RM em Angra 2 [12].

As orientações propostas são precedidas por discussões que levam em consideração a natureza de um submarino nuclear. Em linhas gerais a metodologia de desenvolvimento deste trabalho está representada na Figura 2.

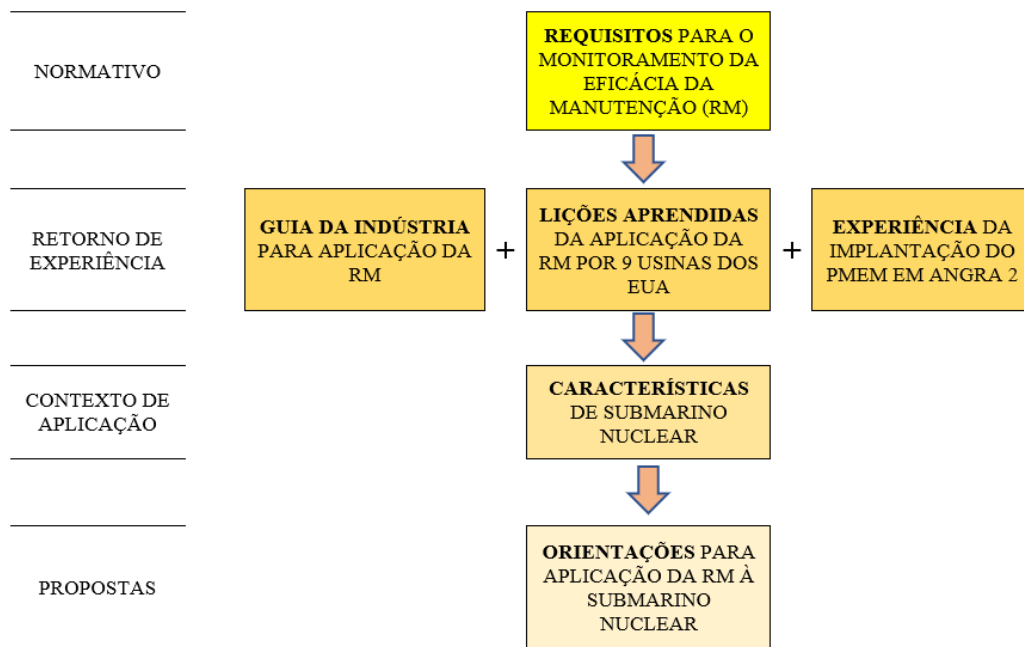
As orientações aqui apresentadas devem ser consideradas como orientações de projeto (*design*) devido à temporalidade em que as ações delas decorrentes devem ser executadas, ou seja, são orientações de projeto para a tomada de ações durante as fases de concepção, desenvolvimento e produção do ciclo de vida de um submarino nuclear.

De um modo geral, os requisitos da RM avaliam a eficácia das ações de manutenção de modo a garantir que o sistema (nesse caso, o submarino) opere conforme projetado. A eficácia das ações de manutenção, por sua vez, reflete o grau de sustentabilidade logística de um certo sistema. Logo, é razoável considerar que as orientações de projeto para o monitoramento da eficácia da manutenção são ações de planejamento logístico, e, portanto, podem ser organizadas dentro do contexto da metodologia de Apoio Logístico Integrado (ALI). A metodologia de Apoio Logístico Integrado será apresentada no Capítulo 4.

Durante as fases de *design* (concepção, desenvolvimento e produção) as ações de planejamento logístico influenciam a arquitetura do sistema e geram produtos<sup>6</sup> que auxiliarão a gestão da sustentabilidade logística desse sistema durante a sua vida útil. Serão indicados ao longo do desenvolvimento deste texto os produtos logísticos relacionados com o monitoramento da eficácia da manutenção decorrentes da execução das orientações aqui propostas (Figura 3).

---

<sup>6</sup> São conhecidos como produtos logísticos e englobam, por exemplo: lista de itens importantes à segurança; estruturas e sistemas em escopo de monitoramento; índices de desempenho de sistemas críticos; etc.



**Figura 2:** Metodologia de desenvolvimento do trabalho



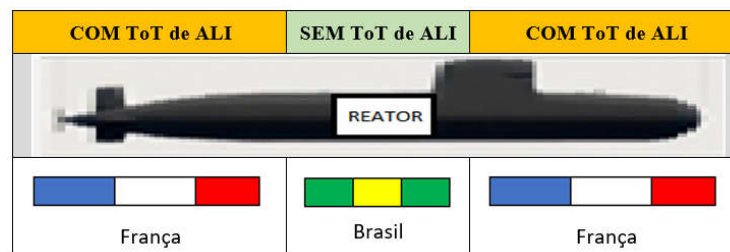
**Figura 3:** Geração de produtos logísticos relacionados com o monitoramento da eficácia da manutenção

#### 1.4 Justificativa para apresentação da metodologia de ALI

A metodologia de ALI é apresentada neste trabalho por fazer parte da Transferência de Tecnologia (ToT), entre Brasil e França, para projeto e construção de um submarino com propulsão nuclear [13].

Este processo de transferência de tecnologia não prevê assessoria técnica de desenvolvimento para estruturas, sistemas e componentes diretamente ligados à planta nuclear. Assim, a metodologia de ALI está sendo aplicada, com assessoria técnica francesa, para as demais estruturas, sistemas e componentes do submarino, vide Figura 4. Cabe à Marinha do Brasil, caso lhe convenha, aplicar esta metodologia na parte diretamente ligada à planta nuclear utilizando, por exemplo, os conhecimentos de ALI adquiridos na ToT.

A metodologia de ALI é amplamente aplicada nos programas de defesa ao redor do mundo, tendo várias fontes de referência para a sua implantação. Tendo sido também usada em larga escala para o desenvolvimento industrial privado, tal como o projeto de 161 trens para transporte em massa, a partir de um consórcio formado pelas empresas Bombardier e Alstom [14]. Claude *et al* citam também que a AREVA TA figurou como líder no segmento de projeto e desenvolvimento de trens, culminando com o comissionamento do seu primeiro metrô subterrâneo em 2007 [14]. Este projeto utilizou a engenharia integrada (ALI) para melhorar a disponibilidade, manutenibilidade<sup>7</sup>, custos de operação e redução de ruídos para os novos trens, mantendo-os totalmente compatíveis com os trilhos já existentes.



**Figura 4:** Área de aplicação do ALI no ToT entre Brasil e França para o submarino nuclear

O desenvolvimento de reatores nucleares para a propulsão naval ainda resguarda um alto nível de confidencialidade, pelo fato de dar aos países detentores de tal tecnologia a possibilidade de construir armas com alta capacidade de dissuasão, como é o caso do submarino de propulsão nuclear, vide limitação, citada acima, na ToT entre Brasil e França [13]. Por esse motivo, as referências acadêmicas da aplicação da metodologia detalhada de ALI para o desenvolvimento de submarinos com propulsão nuclear são escassas.

Como forma de maximizar o conhecimento adquirido na ToT entre Brasil e França, e frente ao desafio da MB de licenciar junto à CNEN um submarino com propulsão nuclear, foi selecionada esta metodologia de ALI, de modo a se obter uma avaliação da pertinência de sua aplicação para incorporar requisitos associados ao processo de monitoramento da eficácia da manutenção durante as fases de concepção e desenvolvimento do projeto.

<sup>7</sup> São características intrínsecas de um sistema que tornam sua manutenção mais, ou menos, fácil.

## **1.5 Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo 2 apresenta uma visão geral do normativo relacionado à regra da manutenção nos EUA e no Brasil. O Capítulo 3 apresenta uma visão geral dos principais conceitos e características do ciclo de vida de sistemas. O Capítulo 4 apresenta a metodologia de apoio logístico integrado (ALI) utilizada para, juntamente com os conceitos de engenharia de sistemas e ciclo de vida, planejar o monitoramento da eficácia da manutenção (MEM) para o submarino. No capítulo 5 são apresentadas as principais características de um submarino nuclear. O capítulo 6 reúne algumas orientações, discussões e produtos logísticos relacionados ao planejamento do MEM decorrentes da observação de requisitos normativos e consideração da aplicação destes requisitos em usinas comerciais. E por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e recomendações deste trabalho.

## Capítulo 2 - Regra da Manutenção

### 2.1 Regra da Manutenção nos EUA

Em 10 de julho de 1991 foram publicados pela NRC [8], órgão regulador nuclear norte-americano, os requisitos para o monitoramento da eficácia da manutenção em usinas nucleoeletrônicas (vide Tabela 1), conhecido como Regra da Manutenção (RM).

**Tabela 1:** Requisitos para o monitoramento da eficácia da manutenção [8]

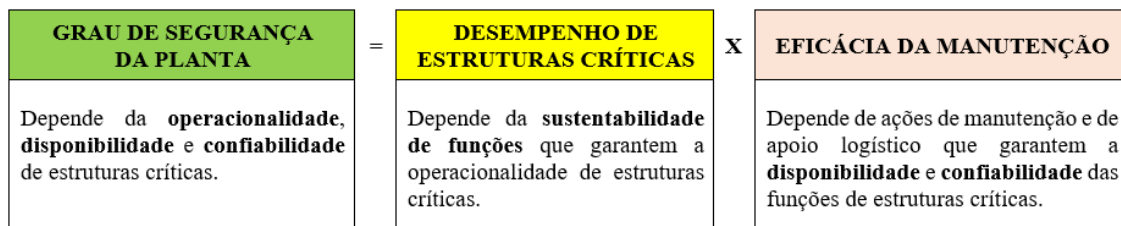
Item	Descrição
(a)(1)	Cada organização operadora de usina nuclear deve monitorar o desempenho ou condição de estruturas, sistemas e componentes (ESC) por meio de metas estabelecidas pela própria organização operadora, de maneira suficiente a fornecer garantias razoáveis que essas estruturas, sistemas, e componentes, conforme definido no parágrafo (b) desta seção, são capazes de cumprir suas funções pretendidas. Essas metas devem ser estabelecidas de modo compatível com a segurança, e, quando possível, levar em consideração a experiência operacional da indústria. Quando o desempenho ou a condição da estrutura, sistema, ou componente não satisfizer as metas estabelecidas, devem ser tomadas ações corretivas apropriadas.
(a)(2)	A monitoração como especificado no parágrafo (a)(1) desta seção não é necessária quando é demonstrado que o desempenho ou a condição de uma estrutura, sistema, ou componente está sendo efetivamente controlado através da realização de <b>manutenção preventiva adequada</b> , de modo que a estrutura, sistema, ou componente permaneça capaz de executar suas funções pretendidas.
(a)(3)	Atividades de monitoramento de desempenho, condição, e suas metas associadas, bem como, atividades de manutenção preventiva devem ser avaliadas no mínimo a cada ciclo de troca de combustível desde que o intervalo entre as avaliações não exceda 24 meses. As avaliações devem levar em conta, quando aplicável, a experiência operacional de toda a indústria. Ajustes devem ser feitos quando necessário de modo a garantir que o objetivo de evitar falhas de estruturas, sistemas, ou componentes através de manutenção seja devidamente equilibrado contra o objetivo de minimizar a indisponibilidade de estruturas, sistemas, e componentes devido ao monitoramento ou à manutenção preventiva.
(a)(4)	Antes de realizar atividades de manutenção (incluindo, mas não limitadas a monitoramento, testes pós-manutenção e manutenções preventivas e corretivas) a organização operadora deve avaliar e gerenciar o aumento do risco que pode resultar das atividades de manutenção propostas.
(b)	O escopo do programa de monitoramento especificado em (a)(1) deve incluir <b>ESC relacionados com a segurança e ESC não relacionados com a segurança</b> .
(b)(1)	<b>ESC relacionados com a segurança:</b> aqueles que devem permanecer operacionais durante e após eventos da base de projeto a fim de garantir: a integridade da barreira



	de pressão do primário; a capacidade de desligamento do reator e mantê-lo em condições seguras; e a capacidade de evitar ou mitigar as consequências de acidentes que possam resultar em exposição externa.
(b)(2)	<p><b>ESC não relacionados com a segurança:</b></p> <p>(i) aqueles que devem mitigar acidentes ou transientes, ou são usados em procedimentos operacionais de emergência (POEs); ou</p> <p>(ii) aqueles cuja falha pode evitar que ESC relacionados com a segurança cumpram suas funções de segurança; ou</p> <p>(iii) aqueles cuja falha pode causar o desligamento do reator ou a atuação de um sistema de segurança.</p>

Para a NRC [10], a eficácia da manutenção deve ser avaliada continuamente para verificar que estruturas, sistemas e componentes principais são capazes de realizar suas funções conforme projetado. Aponta também que a boa manutenção ajuda a limitar o número de transientes e de desafios aos sistemas de segurança através da garantia da operabilidade, disponibilidade e confiabilidade.

Este mesmo órgão regulador afirma que a necessidade da regra da manutenção se torna obrigatória, uma vez que a manutenção realizada de forma correta é essencial para a segurança da planta, havendo uma relação direta entre segurança e a eficácia da manutenção. Essa relação entre eficácia da manutenção, desempenho de ESC críticos e segurança da planta pode ser visualizada conforme mostrado na Figura 5.



**Figura 5:** Relação entre eficácia da manutenção, desempenho de ESC críticos e segurança da planta

Em julho de 1999, a NRC [8] acrescentou o item (a)(4) aos requisitos da RM estabelecendo que a organização operadora deve avaliar e gerenciar o aumento do risco que pode resultar das atividades de manutenção propostas antes de realizá-las. De fato, a realização de atividades de manutenção pode, por vezes, caracterizar alterações momentâneas na arquitetura do sistema, ou seja, modificações temporárias de projeto. Tais

modificações temporárias podem acarretar que sistemas de segurança possam ter sua atuação limitada, ou, no pior caso, interrompidas.

A publicação dos requisitos da RM pela NRC consolidou as ações que a indústria vinha realizando desde a década 80 nos EUA a fim de difundir que a realização de manutenção adequada aumentava de forma considerável o desempenho de uma planta. Houve nesse período uma grande troca de experiências sobre as melhores práticas de manutenção [9].

Nesse sentido de compartilhar as melhores práticas de manutenção foi publicado em 1993 um guia da indústria para a implantação da RM em plantas nucleares, o NUMARC 93-01 [9]. Esse guia explora os requisitos da RM apresentando orientações de aplicação com uma linguagem elucidativa para os utilizadores finais. Em um esforço conjunto com a indústria, a NRC vem endossando publicamente a utilização daquele guia por meio de um *Regulatory Guide* [15].

A NRC estabeleceu o ano de 1996 para que as organizações operadoras estivessem com os requisitos da RM plenamente implantados. Durante o período de implantação, 1991-1995, a NRC inspecionou previamente a implantação da RM em nove usinas nucleares a fim de avaliar o entendimento da indústria acerca dos requisitos então estabelecidos, culminado em 1995 com a publicação de um relatório de lições aprendidas [10]. Tal documento foi fundamental para comprovar que, de um modo geral, a indústria conseguiu implantar os requisitos da RM utilizando o guia de implantação proposto [9].

Anos depois, em 1999, foi publicado um segundo relatório de lições aprendidas da implantação da RM com um número bem maior de usinas, 71, sendo 68 em operação e 3 instalações de armazenamento de rejeitos nucleares [11]. Este relatório avaliou que, de um modo geral, as organizações operadoras conseguiram classificar as ESC no escopo da RM utilizando para isso um grupo de especialistas da própria planta. Foi observado que esses grupos de especialistas utilizaram de forma balanceada tanto abordagens determinísticas quanto probabilísticas para classificar as ESC mais significativas em relação ao risco. A NRC, por meio deste relatório, conseguiu também avaliar a adequabilidade do seu Procedimento de Inspeção da RM [16].

## 2.2 Regra da Manutenção no Brasil

No Brasil, considerando a importância da manutenção, a CNEN publicou em agosto de 1991 uma norma sobre manutenção [3] que determina os requisitos administrativos e organizacionais para o estabelecimento de um programa de manutenção de usinas nucleoeletricas. Essa norma definiu requisitos importantes para os seguintes elementos do sistema de apoio à usina: programa de manutenção; instalações de manutenção; substituições e reparos; modificações decorrentes de manutenção; materiais, itens e componentes sobressalentes.

O grande destaque dessa norma está no item 12, onde a CNEN [3] determina que a organização operadora deve estabelecer um programa de monitoramento de manutenção, a fim de assegurar que o programa de manutenção esteja sendo implantado de acordo com o planejado. Os itens 12.2.2 e 12.2.3 determinam que devem ser estabelecidos índices de desempenho de modo que seja possível monitorar e avaliar a eficiência do programa de manutenção, analisando para isso:

- a) adequação do programa de manutenção preventiva e sua implantação;
- b) resposta aos requisitos de manutenção corretiva;
- c) controle satisfatório de doses de radiação;
- d) uso efetivo de recursos;
- e) nível de treinamento e experiência;
- f) cumprimento dos requisitos de garantia da qualidade; e
- g) adequação de procedimentos e instruções.

Pode-se considerar, sem perda de generalidade, que estes subitens remetem à ideia que os índices de desempenho do programa de manutenção devem avaliar tanto a qualidade dos serviços prestados quanto o uso sustentável dos recursos empregados (material, pessoal e financeiro), conforme mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Exemplos de foco de avaliação para o programa de manutenção exigido pela CNEN [3]

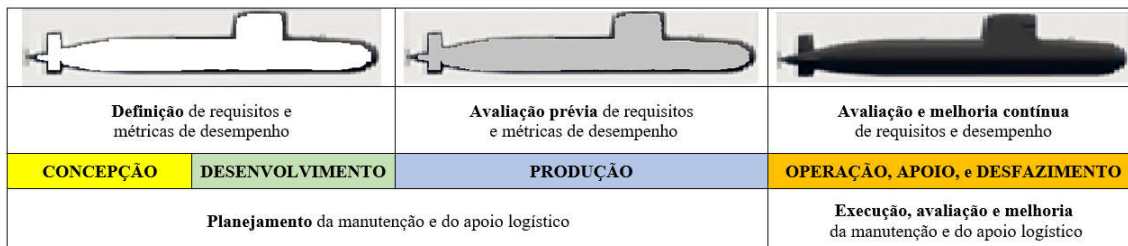
		Foco da avaliação:	
#	Item de avaliação pela CNEN 1.21	Qualidade dos serviços prestados	Uso sustentável dos recursos empregados
1	Adequação do programa de manutenção preventiva e sua implementação	Gestão do sistema	Gestão do sistema de apoio
2	Resposta aos requisitos de manutenção corretiva	Desempenho do sistema	Desempenho do sistema de apoio
3	Controle satisfatório de doses de radiação	Segurança do sistema	Segurança do pessoal e do público em geral
4	Uso efetivo de recursos	Desempenho de pessoal, infraestrutura e finanças	Compartilhamento inteligente de recursos.
5	Nível de treinamento e experiência	Qualificação definida e treinamento realizado	Compartilhamento de pessoal e retorno de experiência
6	Cumprimento dos requisitos de garantia da qualidade	Realizar correto o serviço	Realizar o serviço correto
7	Adequação de procedimentos e instruções	Procedimentos e instruções claros e precisos	Compartilhamento de boas práticas

A avaliação da eficácia das ações de manutenção executadas para manter um certo sistema com base na qualidade dos serviços e no uso sustentável dos recursos empregados exige o uso de uma estratégia de gestão baseada em desempenho, tanto para a manutenção quanto para a logística. Este tipo de estratégia de gestão do sistema é necessária quando se deseja maximizar a disponibilidade operacional do sistema, com a segurança necessária ao menor custo permitido.

Cabe ressaltar que esse viés da gestão do sistema como foco na disponibilidade operacional, segurança e custo exige um planejamento mais amplo e robusto com definição de requisitos e métricas de desempenho desde a fase de projeto, necessitando, portanto, de uma visão do ciclo de vida, ou seja, desde a concepção até o descarte.

Percebe-se que tal entendimento está alinhado com a orientação para avaliação do programa de manutenção proposto pelo item 12 da CNEN 1.21 [3], “[...] assegurar que o programa de manutenção esteja sendo implantado de acordo com o projeto, códigos e normas reguladoras e seus próprios procedimentos”. E também com o item (a)(1) da RM [8], “[...] de maneira suficiente a fornecer garantias razoáveis que essas estruturas, sistemas,

e componentes, conforme definido no parágrafo (b) desta seção, são capazes de cumprir suas funções pretendidas.”, uma vez que os requisitos (códigos, normas e procedimentos) e métricas de desempenho (projeto e funções pretendidas) são definidos antes da entrada em operação da usina ou do submarino. Mais especificamente, tais requisitos e métricas de desempenho são definidos nas fases de concepção e desenvolvimento, e previamente avaliados na fase de produção (Figura 6).



**Figura 6:** Definição e avaliação prévia de requisitos e métricas de desempenho antes da entrada em operação do submarino

Em outubro de 1997, foi publicada a norma CNEN 1.26 [4] com o estabelecimento de requisitos mínimos necessários para garantir uma operação segura em usinas nucleares. O grande destaque dessa norma, item 20.3, é a determinação para que a organização operadora avalie e quantifique os riscos relacionados com as atividades de manutenção, em pleno alinhamento com o item (b)(4) da RM:

- Durante a operação da usina, deverá ser considerado o impacto no risco total, quantificado através de modelo para gerenciamento do risco, nas tomadas de decisão envolvendo, entre outras, as seguintes atividades:
- a) modificações de projeto, alterações ou exceções às especificações técnicas;
  - b) gerenciamento de configurações de sistemas;
  - c) planejamento de manutenção e testes periódicos;
  - d) análise de eventos operacionais. [4]

Como já dito anteriormente, as atividades de manutenção podem, mesmo que de forma temporária, caracterizar modificações de projeto, e, conseqüentemente, alterar a configuração de sistemas envolvidos com a segurança da operação, necessitando, para tanto, de uma gestão do risco envolvido por ocasião da realização dessas manutenções.

O que se nota também aqui é a necessidade de um planejamento da manutenção e do apoio logístico ainda mais detalhado e robusto nas fases de projeto do submarino (concepção, desenvolvimento e produção), definindo, por exemplo, para uma certa atividade de manutenção informações do tipo:

- a) Condição do submarino durante manutenção (atracado, dique ou navegando);
- b) Estado do reator;
- c) Configuração da arquitetura (antes e durante a atividade de manutenção);
- d) Condição de segurança da planta (antes, durante e após a atividade de manutenção);
- e) Gestão do risco (medidas mitigadoras, condições de exclusão, etc.).

Informações como as elencadas acima podem (e devem) ser definidas ainda na fase de projeto. Fica patente, pelo exposto, a necessidade de explorar as principais características das fases do ciclo de vida de um sistema de interesse, a fim de contribuir de maneira mais assertiva com o planejamento da manutenção e do apoio logístico que estejam relacionados ao monitoramento da eficácia da manutenção por ocasião da entrada em operação do submarino nuclear. As principais características do ciclo de vida de sistemas serão exploradas no Capítulo 3.

## Capítulo 3 - Ciclo de Vida de Sistemas

Neste capítulo, são apresentadas as principais características do ciclo de vida de um sistema de interesse. Tais características são necessárias para um melhor entendimento de como cada uma das fases desse ciclo contribui para a realização de uma parte desse sistema.

### 3.1 Conceito de Sistema

O ponto de partida para as discussões que tratam das principais características do ciclo de vida de sistemas é a definição do conceito<sup>8</sup> de “sistema”. Apresentado em diversas fontes e normas, o conceito de sistema é genérico, mas pode ser resumido de maneira mais abrangente conforme o item 3.2.1 da ABNT NBR ISO 9000:2005 [17].

“Sistema: conjunto de elementos inter-relacionados ou interativos.”

As referências da área de engenharia de sistemas também apresentam um conceito genérico para sistema, entretanto, o associam a um objetivo que pode abranger diversas áreas de aplicação, conforme explorado na Tabela 3.

Devido à pluralidade de possíveis áreas de aplicação, na prática, procura-se delimitar o contexto de abrangência à qual o sistema se refere associando um complemento, tais como: sistema de transporte; sistema de gestão; sistema de ensino; sistema de apoio logístico; sistema técnico, sistema de armas, etc. Na verdade, o mais importante é definir de forma precisa o sistema que é objeto de estudo, recebendo, por vezes, a denominação de sistema de interesse.

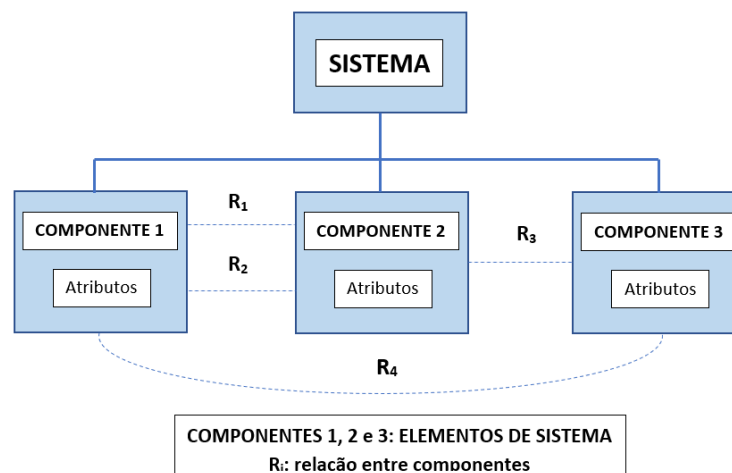
A caracterização de um sistema de interesse por meio de um complemento ainda não é suficiente para descrever claramente seu conjunto de elementos, e suas inter-relações, principalmente quando há uma quantidade grande de elementos que desempenham funções diferentes. BLANCHARD [18] assume que um sistema é constituído por componentes, seus atributos e suas inter-relações, os quais são chamados de elementos de sistema, conforme ilustrado na Figura 7.

---

<sup>8</sup> Nesse caso “conceito” significa: ideia de; o que se entende por.

**Tabela 3:** Conceito de sistema para diferentes áreas de aplicação [18]

Área de aplicação	Conceito de Sistema
Transporte	“Uma coleção ou combinação de elementos ou peças que formam um conjunto complexo ou unitário, como um sistema fluvial ou um sistema de transporte.”
Filosofia	"Uma coleção ordenada e abrangente de fatos, princípios ou doutrinas em um campo particular de conhecimento ou pensamento, como um sistema de filosofia".
Gestão organizacional	"Um conjunto coordenado de métodos, ou um esquema complexo, ou plano de procedimento, como um sistema de organização e gerenciamento".
Identificação e medição	"Qualquer método regular ou especial, ou plano de procedimento, como um sistema de marcação, numeração ou medição".



**Figura 7:** Representação da constituição de um sistema conforme BLANCHARD [18]

De fato, a complexidade crescente dos sistemas ao longo dos tempos tem exigido um esforço conjunto de diversas áreas técnicas para o desenvolvimento de ferramentas que permitam a definição precisa de sistemas a fim de satisfazer o atendimento de uma certa necessidade. A engenharia de sistemas tem ganhado força como elemento agregador dessas diversas áreas técnicas na busca das melhores práticas para a descrição e concepção de sistemas complexos que atendam um objetivo definido.



Mas quais são as características de um sistema complexo? Em geral, os sistemas complexos possuem na sua arquitetura<sup>9</sup> um número elevado de componentes, cada um destes com uma infinidade de atributos, e com uma quantidade maior ainda de relações entre eles. ABREU [19] classifica o submarino com propulsão nuclear brasileiro (SN-BR) como um sistema de defesa de alta complexidade por demandar uma quantidade significativa de pessoal especializado, e considerável quantidade de peças a serem fabricadas e catalogadas (aproximadamente 1.000.000 de itens).

Em geral, sistemas complexos com as características citadas acima são inerentes à indústria de óleo e gás, da área nuclear e do setor de defesa, como é o caso de plataformas de exploração de petróleo, usinas e submarinos nucleares. Na maioria dos casos, tal complexidade decorre do fato desses sistemas terem que atender múltiplos objetivos, que, geralmente, estão associados com o cumprimento da missão (militar), preservação do sistema/equipamentos, preservação da tripulação, do público em geral e do meio ambiente.

Nesse sentido, em busca de um entendimento único e de fácil acesso, será considerado nesse trabalho o conceito de sistema de acordo com o apresentado pela norma ISO 15288:2015 [5], conforme a seguir<sup>10</sup>:

“Sistema: Combinação de elementos interativos organizados para atender a um ou mais objetivos explicitados.”

“Elemento de sistema: Membro de um conjunto de elementos que constituem um sistema.”

**FONTE:** Conforme tradução proposta por ABNT NBR ISO 15288:2009 [20].

Cabe ressaltar alguns pontos de destaque que decorrem da definição proposta acima. Primeiro: um sistema tem a sua arquitetura formada por um conjunto de elementos de sistema (ver Figura 8).

Segundo: os elementos de sistema que compõem um dado sistema (como na Figura 8) interagem de forma organizada de modo que este sistema atenda um ou mais objetivos

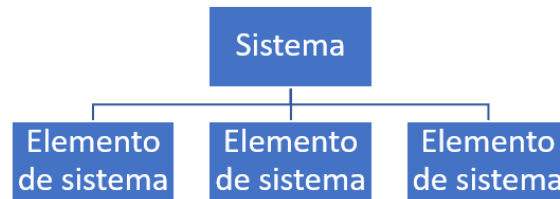
---

<sup>9</sup> Conforme a definição de “arquitetura” proposta pela ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5].

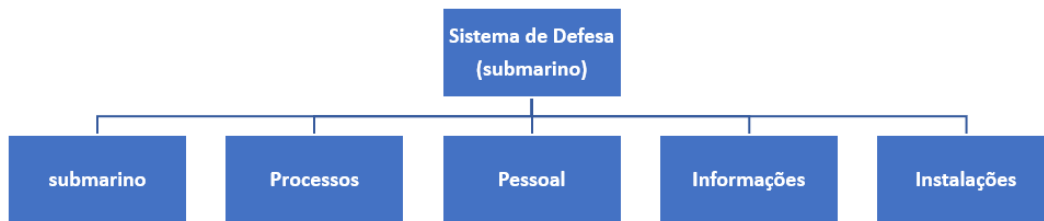
<sup>10</sup> Esse mesmo conceito de sistema também vem sendo adotado como referência por órgãos de excelência na discussão e propagação das melhores práticas em engenharia de sistemas, como é o caso do INCOSE [21].

definidos. Ou seja, um elemento de sistema compõe a arquitetura de um dado sistema se, e somente se, ele contribui para o cumprimento de um dos objetivos deste sistema.

Terceiro: a ISO 15288:2015 [5], BLANCHARD [18] e o INCOSE [21] consideram que os elementos de sistemas podem ser produtos (hardware, software), processos, pessoas, dados, informação, técnicas, instalações, serviços, ou qualquer outro elemento que contribua para o cumprimento de um objetivo específico (Figura 9).

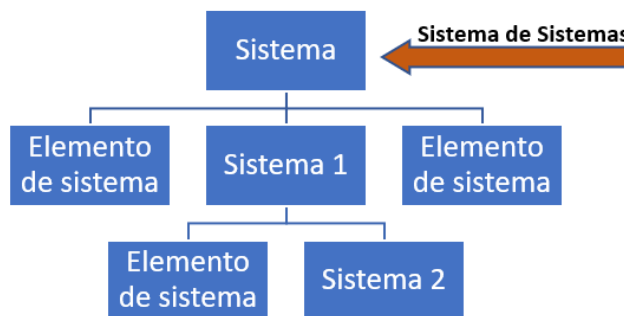


**Figura 8:** Representação da constituição de um sistema. **Fonte:** ISO ([5], p.12)



**Figura 9:** Exemplos de elementos de sistemas que constituem um sistema de defesa

Quarto: devido à alta complexidade, alguns sistemas podem ter na sua arquitetura elementos de sistemas que são também eles mesmo um sistema, definindo-se o “sistema de sistemas”, conforme ilustrado na Figura 10.

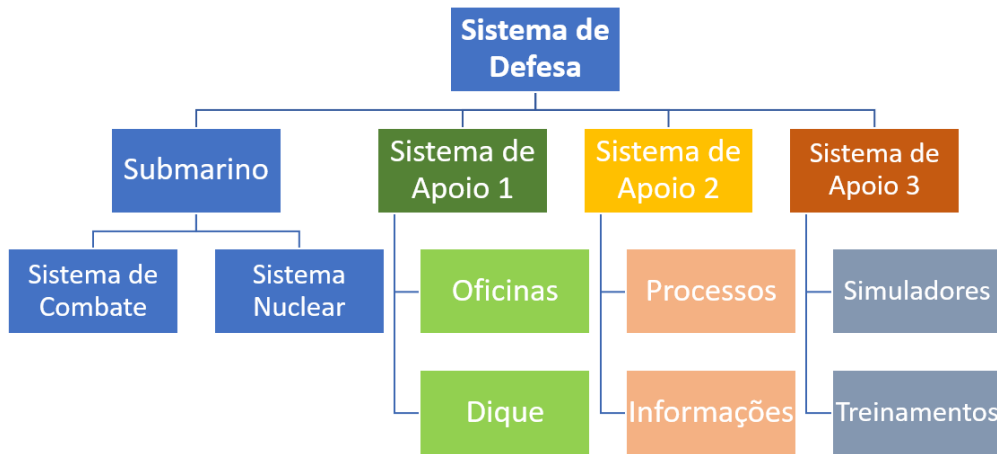


**Figura 10:** Representação de um sistema que tem na sua arquitetura outros sistemas

Por fim, finalizando a discussão sobre conceito de sistemas, a norma [5] define um tipo especial de sistema, o sistema de apoio. O sistema de apoio contribui para o

cumprimento de um certo objetivo de um sistema de interesse, mas não faz parte do seu ambiente operacional. Por exemplo (ver Figura 11):

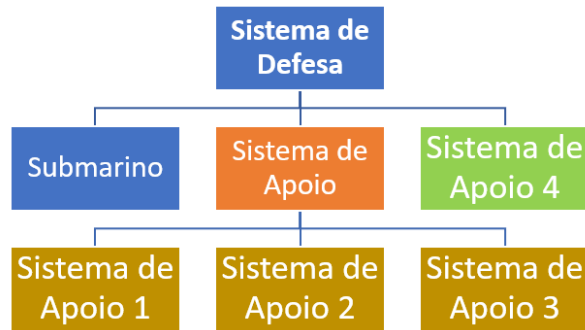
- a) As oficinas e diques de um estaleiro contribuem para a manutenção da capacidade operativa de um submarino nuclear, mas não pertencem ao ambiente operacional desse submarino.
- b) O programa de monitoramento da eficácia da manutenção contribui para avaliar o desempenho de sistemas de segurança de uma usina nuclear, mas não pertence ao ambiente operacional dessa usina.
- c) Simuladores de combate e de imersão contribuem para a manutenção da capacidade operativa da tripulação de um submarino, mas não pertencem ao ambiente operacional deste submarino.



**Figura 11:** Representação de sistemas de apoio (1, 2 e 3) de um sistema de defesa

Os elementos de sistema que constituem a arquitetura de um sistema de apoio são chamados de elementos de apoio. Na Figura 11, os processos e informações são elementos de apoio do “sistema de apoio 2”. De modo semelhante, os “sistemas de apoio 1, 2 e 3” também podem ser chamados de elementos de apoio caso façam parte de um sistema de apoio maior, conforme ilustrado na Figura 12.

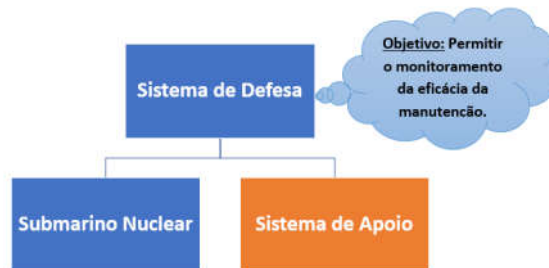
Face ao exposto, percebe-se a necessidade de definir qual é o sistema de interesse que irá servir de base para as discussões aqui apresentadas.



**Figura 12:** Representação de elementos de apoio de um sistema de apoio

### 3.2 Sistema de Interesse utilizado neste trabalho

Partindo do entendimento do conceito de sistema explorado na seção anterior, define-se para este trabalho um sistema de interesse da seguinte forma: sistema de defesa que tem na sua arquitetura um submarino nuclear e um sistema de apoio. Ambos auxiliam o sistema de defesa no cumprimento do seguinte objetivo: permitir o monitoramento da eficácia da manutenção. (ver Figura 13)



**Figura 13:** Representação do sistema de interesse desse trabalho

Uma vez definido o sistema de interesse desse trabalho, o próximo passo é identificar e definir quais são os elementos de apoio necessários para contribuir para o cumprimento do objetivo associado ao monitoramento da eficácia da manutenção (MEM), bem como as características intrínsecas que o submarino precisa ter para viabilizar esse MEM.

Tanto a identificação, definição e avaliação prévia desses elementos de apoio, quanto as características intrínsecas do submarino são realizadas ao longo das fases do ciclo de vida.

### 3.3 Fases do ciclo de vida de sistemas

A vida de um ser humano pode ser dividida por fases, que de um modo geral se repetem formando um ciclo. Por exemplo: fecundação do óvulo com formação e desenvolvimento

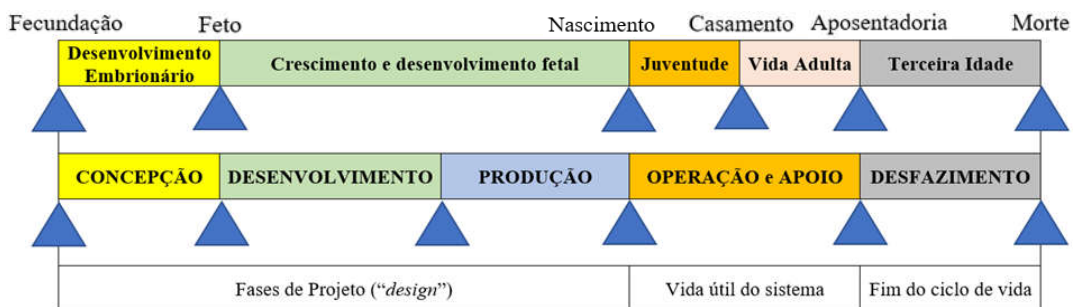
embrionário; desenvolvimento e crescimento fetal; nascimento e juventude; fase adulta; terceira idade e o fim da vida marcado pela morte.

De maneira semelhante, os sistemas também possuem um ciclo de vida marcado por fases que, de um modo geral, se repetem formando um ciclo de vida (CV). Por exemplo, os sistemas são idealizados, desenvolvidos, construídos/produzidos, utilizados e descartados. Para os sistemas em geral, é importante que haja um padrão minimamente estabelecido de fases formando um CV, de modo que haja condições favoráveis para a comunicação dos objetivos a serem alcançados, e principalmente para facilitar a gestão das diversas atividades pertencentes a cada uma das fases.

Um padrão de CV para sistemas que tem sido usado como referência tanto por organismos de excelência na discussão das boas práticas a serem usadas na engenharia de sistemas, como é o caso do INCOSE [21], quanto por programas de defesa de países membros da OTAN [22] e pela NASA [23], é o definido pela ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5]. Esta norma define que o ciclo de vida de sistemas é composto pelas seguintes fases: concepção, desenvolvimento, produção, operação, apoio, desfazimento.

Visando a consideração das boas práticas difundidas pelo INCOSE, e a similaridade de complexidade entre o submarino nuclear e os sistemas dos programas de defesa da OTAN e da NASA, serão consideradas como referência nesse trabalho as fases de CV de sistemas conforme definido pela ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5].

É possível apresentar as principais características inerentes ao ciclo de vida de sistema de defesa fazendo um paralelo (vide Figura 14) entre o ciclo de vida do ser humano e o ciclo de vida de um sistema qualquer.



**Figura 14:** Comparação entre o ciclo de vida de um ser humano e o ciclo de vida de um sistema qualquer

Da Figura 14 é possível fazer algumas considerações:

- (i) **Fases bem definidas:** Assim como o ciclo de vida do ser humano, o ciclo de vida de sistemas é caracterizado por fases bem definidas, ou seja, realizam uma parte do sistema em um dado momento do ciclo de vida com propósitos definidos. Um exemplo é apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4:** Exemplo de fase do ser humano e fase de um sistema de defesa

Ser humano	Sistema de Defesa
<b>Fase:</b> Desenvolvimento Embrionário	<b>Fase:</b> Concepção
<b>Propósito:</b> Desenvolvimento inicial do embrião humano através de sucessivas divisões celulares.	<b>Propósito:</b> Identificar as alternativas viáveis, definir o projeto, identificar e iniciar as tecnologias envolvidas [23].

- (ii) **Existência de entradas, atividades e saídas:** Para o cumprimento do propósito de cada fase são realizadas diversas atividades que utilizam informações de entrada (os insumos) gerando informações de saída (os produtos). Um exemplo é apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5:** Processamento de entradas e geração de produtos nas fases do CV

Ser humano			Sistema de Defesa		
Fase: Desenvolvimento Fetal			Fase: Concepção		
Entrada	Atividade	Saída	Entrada	Atividade	Saída
Proteínas	Divisão celular	- Tecidos - Órgãos	Requisitos	Análise de requisitos	- Conceito operacional, de manutenção e de apoio logístico.

- (iii) **Uso de Processos:** Assim como são realizadas atividades processuais no ciclo de vida do ser humano (por exemplo, processo de divisão celular<sup>11</sup>) as atividades em uma fase do ciclo de vida de sistemas são realizadas por meio de processos (por exemplo, processo de análise funcional).
- (iv) **Existência de Subfases:** No ciclo de vida do ser humano a fase juvenil pode ser subdividida em fase infantil e adolescência. As fases do ciclo de vida de sistemas também podem ser subdivididas em subfases a fim de facilitar a gestão das atividades ali realizadas. Um exemplo é apresentado na Tabela 6.


<sup>11</sup> O processo de divisão celular (do tipo mitose) compreende as seguintes etapas: prófase, metáfase, anáfase e telófase [24].

**Tabela 6:** Exemplos de subfases no ciclo de vida de um ser humano e de um sistema.

Ser humano		Sistema de Defesa	
Fase: Juvenil		Fase: Produção	
Infantil	Adolescência	Construção	Comissionamento

- (v) **Controle da Transição entre fases:** Assim como a transição entre as fases do ciclo de vida do ser humano são controladas pela verificação de uma condição (por exemplo, a fase embrionária é iniciada após a fecundação do óvulo e finalizada com o surgimento do feto), as transições de fases do CV de sistemas são feitas por meio de pontos de controle<sup>12</sup>. Um exemplo é apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7:** Exemplo de transição de fases no ciclo de vida de um sistema

Sistema de Defesa		
Produção		Operação
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construção</li> <li>- Testes de comissionamento</li> </ul>	<p><b>Condições verificadas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Construção finalizada?</li> <li>- Comissionamento ok?</li> </ul> <p><b>Ações:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) Retornar para produção.</li> <li>(2) Prosseguir para operação.</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema operando</li> </ul>

O propósito de cada fase pertencente ao CV de um sistema de interesse é definido pela autoridade de projeto responsável pela gestão do CV desse sistema. Como exemplo serão apresentados (ver Tabelas 8-12) os propósitos das fases do CV utilizados nos programas de defesa da OTAN [22] e da NASA [23].

<sup>12</sup> Os pontos de controle são também conhecidos como: marcos de transição; *kill point*; *gate*; etc.

**Tabela 8:** Exemplos de propósitos para a fase de concepção

ISO/IEC/IEEE 15288:2015	NASA		OTAN	
FASE	FASE	PROPÓSITO	FASE	PROPÓSITO
Concepção	Pré-A: Estudos Conceituais	Produzir um amplo espectro de ideias e alternativas para missões a partir das quais possam ser selecionados novos projetos/programas.	Pré-Concepção	Identificar e documentar os requisitos das partes envolvidas, bem como identificar as áreas de risco (macro) associadas à capacidade desejada.
	A: Concepção e Desenvolvimento de Tecnologia	Determinar a viabilidade e a demanda por um novo sistema principal, e iniciar um alinhamento com os planos estratégicos da NASA.	Concepção	Com base nos requisitos das partes interessadas oriundos da fase anterior, refinar e ampliar os estudos, experimentos e modelos de engenharia obtidos durante a pré-concepção, e desenvolver os requisitos preliminares de sistema bem como uma solução de arquitetura viável.

**Tabela 9:** Exemplos de propósitos para a fase de desenvolvimento

ISO/IEC/IEEE 15288:2015	NASA		OTAN	
FASE	FASE	PROPÓSITO	FASE	PROPÓSITO
Desenvolvimento	B: Projeto preliminar e finalização de tecnologia	Definir o projeto com detalhes suficientes para estabelecer uma configuração capaz de satisfazer as necessidades da missão.	Desenvolvimento	Validação completa da solução técnica escolhida por meio de trabalhos de engenharia até que as atividades de produção possam ser iniciadas. Esta fase é realizada para desenvolver um sistema de interesse que satisfaça e exceda os requisitos definidos, bem como possa ser produzido, testado, avaliado, operado, apoiado e desativado.
	C: Projeto detalhado e fabricação	Finalizar o projeto detalhado do sistema (e seus subsistemas associados), bem como a fabricação de hardware e software.		

**Tabela 10:** Exemplos de propósitos para a fase de produção

ISO/IEC/IEEE 15288:2015	NASA		OTAN	
FASE	FASE	PROPÓSITO	FASE	PROPÓSITO
Produção	D: Montagem, Integração, Teste e Lançamento do Sistema	Montar e integrar os produtos e criar o sistema, além de desenvolver provas objetivas que ele será capaz de satisfazer os requisitos definidos. Conduzir o lançamento do sistema e prepará-lo para as operações.	Produção	Fabricar e testar o sistema de interesse, e produzir os sistemas de apoio conforme definidos.



**Tabela 11:** Exemplos de propósitos para as fases de operação e apoio

ISO/IEC/IEEE 15288:2015	NASA		OTAN	
FASE	FASE	PROPÓSITO	FASE	PROPÓSITO
Operação	E: Operação e sustentabilidade	Conduzir a missão e atender às necessidades inicialmente identificadas, mantendo o suporte necessário.	Operação	Operar o sistema em ambientes operacionais planejados, incluindo modificações e melhorias, para entregar os serviços requeridos de forma operacional continuada e custos aceitáveis. Esta fase se encerra com a retirada de serviço do sistema.
Apoio			Apoio	Fornecer serviços de apoio, de manutenção e de logística que garantam a operação continuada e a sustentabilidade dos serviços. Esta fase é finalizada com a desativação do sistema e o encerramento dos serviços de apoio.

**Tabela 12:** Exemplos de propósitos para a fase de desfazimento

ISO/IEC/IEEE 15288:2015	NASA		OTAN	
FASE	FASE	PROPÓSITO	FASE	PROPÓSITO
Desfazimento	F: Encerramento	Implementar os planos de descomissionamento, ou de descarte, do sistema definidos na Fase C e analisando quaisquer amostras e dados coletados.	Desfazimento	Desmilitarizar e descartar o sistema de interesse ao final da sua vida útil, encerrando os serviços operacionais e de apoio relacionados. Os requisitos para o desfazimento são definidos nas fases precedentes.

Para mais informações, a norma ISO/IEC 24748-1:2010 [25] apresenta uma descrição geral, propósito e resultados esperados para cada uma das fases do CV propostas pela ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5].

Observando as Tabelas 8-12, nota-se que algumas fases foram subdivididas: fase de concepção (NASA e OTAN) e fase de desenvolvimento (NASA), Tabelas 8 e 9, respectivamente. Já no caso das fases de operação e apoio (Tabela 11), a NASA optou por aglutiná-las por entender que as atividades presentes em ambas podem ser realizadas no mesmo espaço temporal do CV.

Ainda com respeito às Tabelas 8-12, é importante realçar outro ponto importante. Devido à natureza complexa de alguns sistemas, tal como, muitas partes interessadas<sup>13</sup>, tecnologias de ponta envolvidas, e alto volume financeiro necessário para a consecução do projeto/programa, é comum que a fase de concepção dê origem a uma subfase destinada à exploração das várias possibilidades de solução que envolvem o sistema ora pretendido. Nessa subfase, define-se de forma macro os requisitos de todas as partes interessadas no sistema para que se possa avaliar as potenciais soluções que serão detalhadas em um segundo momento, identificando-as, por exemplo, pelos riscos envolvidos, quantidade de recursos financeiros e tecnologias necessárias.

Essa subfase tem ganhado cada vez mais espaço no ciclo de vida de projetos/programas de defesa ao redor do planeta<sup>14</sup> por ser o primeiro momento em que se definem, de forma macro, os requisitos das partes envolvidas para um sistema que atenda a uma capacidade oriunda de um Planejamento Baseado em Capacidades (PBC)<sup>15</sup>.

Verdadeiramente, a definição de requisitos não é uma tarefa fácil, pois deve traduzir, de forma clara e bem definida, o desejo do cliente (ou das partes interessadas) para a operação, o apoio logístico e a manutenção do sistema.

Buscando auxiliar esta tarefa de definição dos requisitos de um sistema, a norma ISO/IEC 29148:2011 [27] explora alguns conceitos relacionados ao tema, dentre eles destacam-se o Conceito de Operações (CONOPS<sup>16</sup>) e o Conceito Operacional (OpsCon<sup>17</sup>).

O CONOPS explora os possíveis modos operacionais de uma organização ou Força Armada (FA) em um determinado cenário. Vale destacar que o CONOPS não indica de forma precisa um sistema que pode auxiliar esta organização em cada um desses modos operacionais, contudo, estabelece um conjunto (ou classe) de sistemas com características semelhantes que o faça, conforme explorado na Tabela 13.

---

<sup>13</sup> No caso dos programas de defesa da OTAN os sistemas de interesse possuem vários países envolvidos.

<sup>14</sup> Vide os programas de defesa da OTAN e da NASA.

<sup>15</sup> Algumas Forças Armadas, incluindo as brasileiras, têm utilizado o PBC para direcionar a obtenção de novos sistemas, conforme explorado por PERREIRA [26].

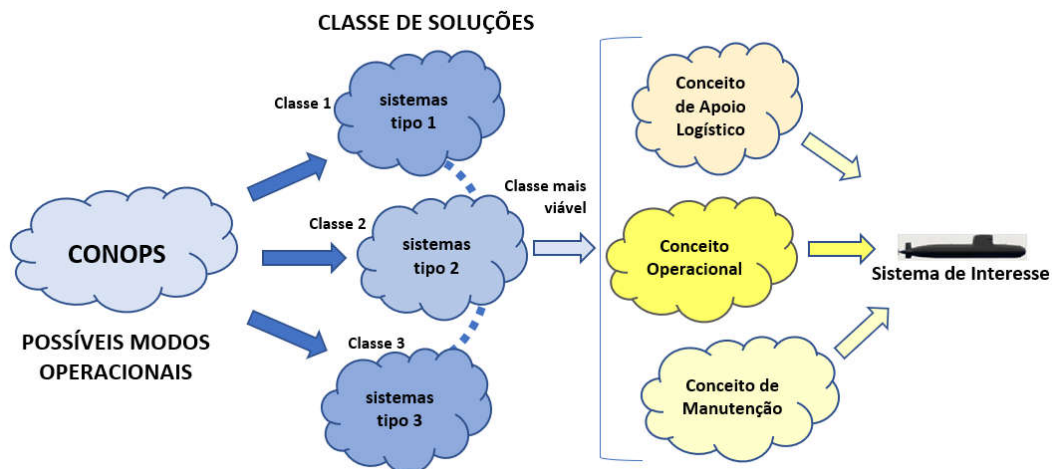
<sup>16</sup> Optou-se pelo uso dos mesmos acrônimos em inglês adotados na norma ISO/IEC 29148:2011 para não incorrer em homonímia.

<sup>17</sup> Id.

O OpsCon, por sua vez, é uma descrição da ideia de operação de um sistema em um cenário específico. A ISO/IEC 29148 [27] destaca que é uma descrição de uso sob o ponto de vista do utilizador do sistema, sendo chamado, por vezes, de conceito de uso. A Tabela 13 e a Figura 15 apresentam uma ilustração do uso e da relação entre CONOPS e OpsCon.

**Tabela 13:** Exemplo da utilização de CONOPS e OpsCon

Cenário: Tráfico de drogas utilizando o espaço aéreo na fronteira do Brasil com os países latino-americanos.				
Capacidade pretendida: Monitoramento do espaço aéreo na fronteira.				
CONOPS <small>(explora possíveis modos operacionais e aponta solução classes de sistemas)</small>	Modos operacionais	Classe de soluções	Conceitos Operacionais (OpsCon)	
	Opção 1: utilização de aeronaves patrulhando a fronteira.	Aeronaves não tripuladas e tripuladas (asa fixa ou móvel)	↕	<b>OpsCon 1:</b> Utilização de aeronaves não tripuladas, operadas e mantidas pela Polícia Federal. Aeronaves projetadas pela FAB/EB. <b>OpsCon 2:</b> Utilização de helicópteros da Força Aérea Brasileira (FAB), operados pela FAB e apoiados logisticamente pelo Exército Brasileiro (EB).
	Opção 2: monitoramento feito por estações em terra.	Estações fixas e móveis	→	<b>OpsCon 3:</b> Utilização de estações radar operadas e mantidas pela FAB.



**Figura 15:** Ilustração da relação entre conceitos de ciclo de vida (operacional, manutenção e apoio logístico) e CONOPS

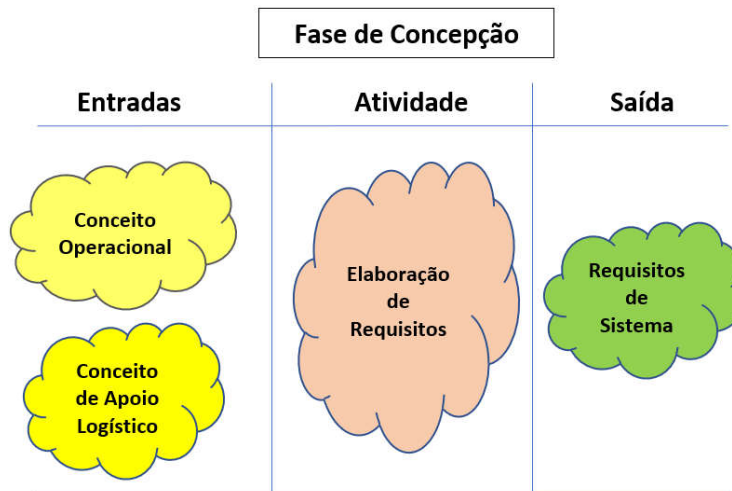
Cabe ressaltar que o OpsCon deve descrever de forma clara as intenções de uso desse sistema nas diversas fases previstas para o seu CV, ou seja, concepção, desenvolvimento, produção, operação, apoio e desfazimento, sendo indicado, quando necessário, realizar a separação do OpsCon em:

- a) **Conceito operacional propriamente dito.** Descreve a forma como se planeja operar o sistema.
- b) **Conceito de desenvolvimento.** Descreve a forma como se planeja desenvolver o projeto (*design*) do sistema.
- c) **Conceito de produção.** Descreve a forma como se planeja montar, integrar, testar e validar o sistema.
- d) **Conceito de manutenção.** Descreve a estratégia de manutenção para o sistema.
- e) **Conceito de apoio logístico.** Descreve o modo que o sistema será apoiado logisticamente.
- f) **Conceito de desfazimento.** Descreve a estratégia de desativação do sistema. (descarte, reuso, armazenamento, aniquilação, etc.)

Fica a critério de cada projeto/programa definir outros conceitos relacionados ao ciclo de vida, por exemplo, conceito de validação, conceito de integração, conceito de comissionamento, etc. Isto irá depender da complexidade do sistema envolvido e das especificidades inerentes a cada ambiente organizacional em que ele esteja sendo gerenciado.

É importante que fique claro que o OpsCon e os demais conceitos não são um conjunto de requisitos de sistema, e sim as intenções de uso para este sistema pensadas/esperadas pelas partes interessadas. Estão disponíveis no Apêndice A os itens que devem compor um OpsCon de acordo com a ISO/IEC 29148:2011 [27].

A elaboração dos requisitos relacionados ao novo sistema será uma das primeiras atividades realizadas na fase de concepção. Tais requisitos são elaborados a partir de análises das considerações/restrições registradas pelos diversos conceitos relacionados ao ciclo de vida desse sistema (operacional, manutenção, apoio logístico, etc.) (ver a Figura 16)



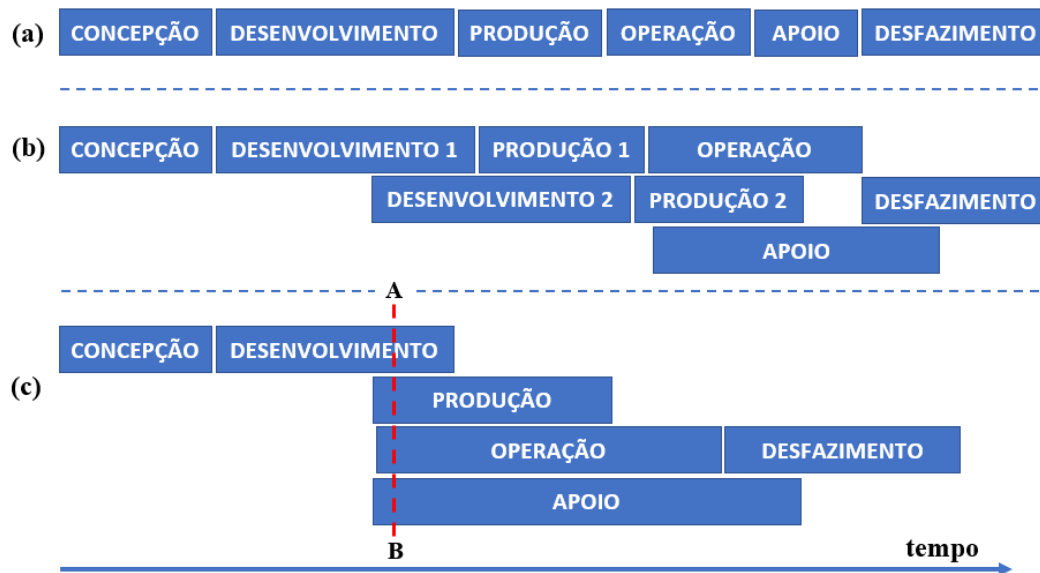
**Figura 16:** Elaboração dos requisitos de sistema durante a fase de concepção a partir dos conceitos relacionados ao CV (operacional, manutenção, apoio logístico, etc.)

Agora que já se tem uma visão geral das fases que compõe o CV de um sistema de interesse, bem como são elaborados os requisitos de sistema a partir de conceitos relacionados ao CV, é necessário conhecer como estas fases podem interagir entre si ao longo desse CV. Os possíveis modos de interação das fases do CV de um sistema serão tratados na próxima seção.

### 3.4 Modelo de ciclo de vida de sistemas de defesa

Depois da elaboração dos requisitos de sistema, uma das principais tarefas realizadas durante a fase de concepção é definir o modo como se planeja desenvolver, produzir, operar, apoiar e desativar um sistema. Um dos modos possíveis é o sequencial, onde as fases do CV são realizadas uma após a outra em uma sequência pré-definida, conforme mostrado na parte (a) da Figura 17.

O modelo de CV mostrado na parte (b) da Figura 17 apresenta desenvolvimento e produção incrementais. Tal modelo se mostra adequado quando a obtenção se dá por lotes de sistemas semelhantes (2 ou mais sistemas por lote), sendo planejada, por exemplo, uma modernização de *design* após o desenvolvimento dos primeiros sistemas, comumente chamados de “cabeças de série”. Isso pode ser interessante quando é possível prever ao longo do desenvolvimento o surgimento de técnicas mais eficientes de *design* ou a obsolescência de algumas tecnologias utilizadas.



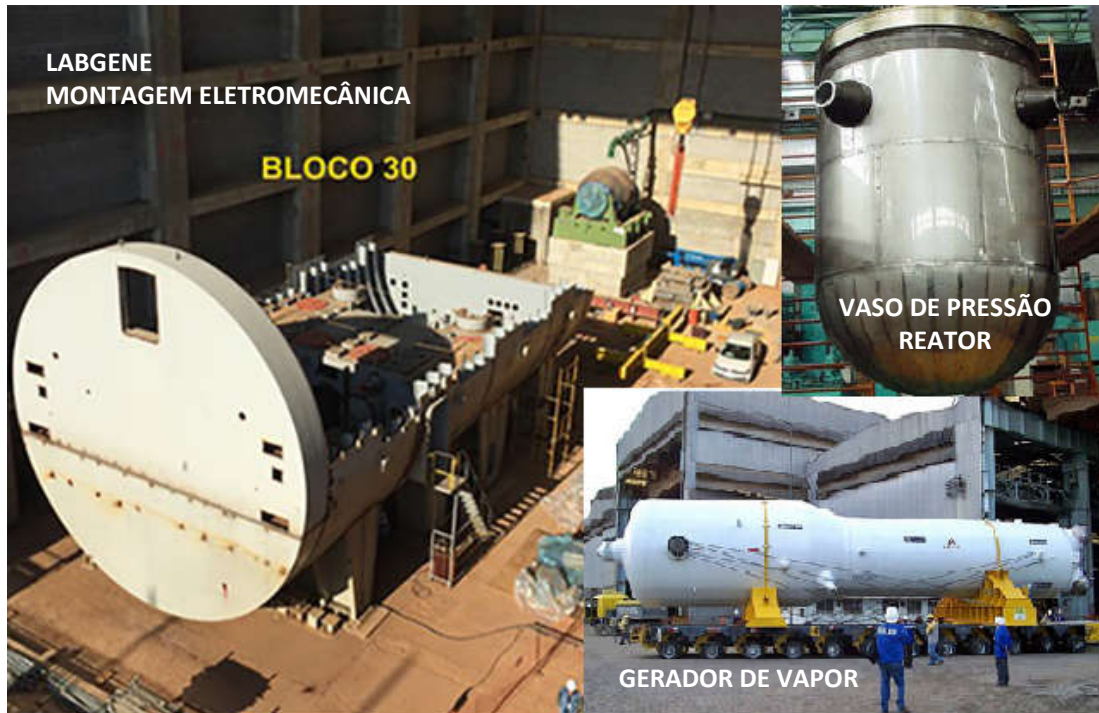
**Figura 17:** Exemplos de modelos de CV. (a) modelo de CV sequencial. (b) modelo de CV com desenvolvimento e produção incremental. (c) modelo de CV típico para sistema de alta complexidade

Para o caso de sistemas de defesa de alta complexidade, como é o caso do submarino nuclear, e seu sistema de apoio, é mais comum o CV mostrado na parte (c) da Figura 17. Nesse tipo de modelo de CV, alguns elementos de sistema têm o seu *design* prontificado antes do término da fase de desenvolvimento, iniciando imediatamente a fase de produção. Estes elementos de sistemas precisam iniciar sua fabricação o quanto antes pois contribuem para o desenvolvimento, ou produção, de outras partes do sistema. Exemplos de elementos de sistema desse tipo são as infraestruturas de teste e validação, como é o caso do LABGENE<sup>18</sup> (Figura 18) que simula partes do SN-BR, as infraestruturas de treinamento e qualificação de pessoal (tanques de imersão/escape, simuladores de navegação, etc.), e as estruturas de produção em larga escala (por exemplo, estaleiro de construção e elevador de submarinos, vide Figura 19).

Outro exemplo de itens de arquitetura que tem seu desenvolvimento finalizado de forma antecipada, ou seja, antes do término da fase, são aqueles que demandam bastante tempo para aquisição/fabricação. Estes itens são chamados de *long lead itens*, como é o caso do vaso de pressão do reator e dos geradores de vapor (ver Figura 18). Os *long lead*

<sup>18</sup> Laboratório de Geração de Energia Núcleo-elétrica destinado a simular partes do Submarino Nuclear Brasileiro com a finalidade de servir de plataforma de treinamento, teste e validação.

itens são identificados logo no início do projeto a fim de não incorrer em atrasos de cronograma e aumentos de custo.



**Figura 18:** Montagem eletromecânica do LABGENE em Iperó-SP (lado esquerdo da fig.) e entrega pela empresa NUCLEP do vaso de pressão do reator e do gerador de vapor do LABGENE (lado direito da fig.). **Fonte:** PADILHA [28] e WILTGEN [29].



**Figura 19:** Prédio principal e elevador de submarinos do estaleiro de construção do SN-BR em Itaguaí-RJ. (a) entrega do elevador de submarinos em dezembro de 2017. (b) concepção artística do local. **Fonte:** PODER NAVAL [28, 29]

À medida que alguns dos itens citados acima são prontificados na fase de produção, podem ser iniciadas algumas atividades intrínsecas das fases de operação e de manutenção.

Por exemplo, o vaso de pressão do reator e o gerador de vapor necessitam de armazenamento e conservação passiva até que sejam instalados definitivamente no submarino. As plataformas de teste e validação, LABGENE por exemplo, são operadas para auxiliar a consecução de tarefas características da parte final das fases de desenvolvimento (teste e validação do *design*) e produção (comissionamento<sup>19</sup>), e, do mesmo modo, necessitam de atividades de manutenção para preservar suas capacidades de projeto.

Outro aspecto a mencionar, é que sistemas de alta complexidade, como um submarino nuclear, podem ter, em um determinado ponto do seu ciclo de vida, elementos de sistema em fases distintas. Este aspecto está representado na parte (c) da Figura 17, onde no instante de tempo representado pelo segmento de reta AB (tracejado vermelho) podem haver elementos de sistema nas fases de desenvolvimento, outros na fase de produção, e outros nas fases de operação e manutenção. Sob essa ótica as fases podem ser entendidas como os possíveis estados que um sistema pode assumir ao longo do CV. Tal entendimento fica evidente quando um determinado sistema está na fase (ou estado) de operação e precisa cumprir uma certa rotina de manutenção, passando, portanto, para a fase (ou estado) de apoio. Ao final da realização da referida manutenção, o sistema pode retornar para a fase de operação. Este aspecto é ilustrado na Figura 20.

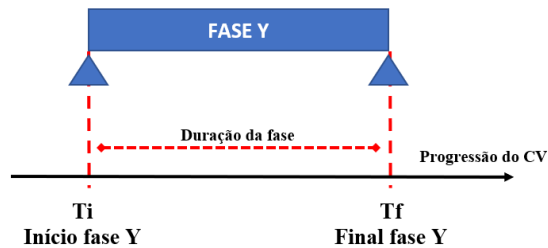
Com esse entendimento de “fase-estado” é possível visualizar que um sistema (ou elemento de sistema) só pode estar em uma determinada fase (ou estado) durante o tempo de duração desta fase, ou seja, entre o instante de tempo que ela inicia e o instante de tempo que ela finaliza (ver Figura 21).



**Figura 20:** Fases do CV visualizada como um possível estado para o sistema de interesse

<sup>19</sup> O comissionamento de submarinos nucleares engloba, por exemplo, a validação de sistemas com o reator em baixas potências.





**Figura 21:** Tempo de duração de uma fase do CV de sistema

Este modelo de CV típico para o submarino nuclear suscita uma observação importante: podem ocorrer atividades de apoio e manutenção de itens no escopo da Regra da Manutenção já durante a construção do submarino. Portanto, as atividades de medição da eficácia de tais ações devem ocorrer daí em diante.

O modelo de ciclo de vida mais adequado deve ser definido ainda na fase de concepção, devendo ser controlado, monitorado, e, quando necessário, atualizado, servindo de instrumento de comunicação para todos os envolvidos que tenham parte no sistema de interesse.

Em resumo, o modelo de CV depende das especificidades do sistema de interesse em questão e da natureza do ambiente de gestão em que o projeto/programa está inserido. Contudo, é marcado fortemente pela interação de fases, nas quais são realizadas atividades e tarefas. Tais atividades e tarefas são realizadas por meio de processos, conhecidos como processos do CV de sistemas. Os principais processos do CV de sistemas são apresentados na próxima seção.

### 3.5 Processos do ciclo de vida de sistemas de defesa

Ao longo do CV de sistemas são realizadas atividades e tarefas com a finalidade de cumprir o propósito estabelecido para cada fase. Tais atividades e tarefas, em geral, são realizadas por meio de um conjunto de processos, chamados de processos de CV.

A ISO/IEC/IEEE 15288 vem empreendendo esforços no sentido de estabelecer um conjunto referência de processos que englobem amplamente as atividades e tarefas de um CV de sistemas de interesse qualquer. A versão de 2015 desta norma organiza os processos

em 4 grupos de processos, são eles<sup>20</sup>: processos técnicos, processos de projeto, processos organizacionais capacitadores de projeto, e processos contratuais. A Figura 22 apresenta os processos pertencentes a cada um desses grupos.

**Grupo de Processos Técnicos.** Os processos deste grupo são responsáveis pela síntese de um produto (que incluem hardware, software, serviço, informação, processo, etc.). Eles auxiliam na caracterização de uma necessidade, ou a definição de um problema, e exploram um conjunto de possíveis soluções que levam em consideração as restrições e considerações das partes interessadas, definindo os requisitos de um sistema-solução mais viável.

É possível a aplicação deles de forma recorrente em qualquer nível da arquitetura do sistema, do mais alto nível, o próprio sistema de interesse, até aos elementos de sistema dos níveis subsequentes, subsistemas, equipamentos e componentes. Eles podem ser aplicados em todas as fases do CV, permitindo o desenvolvimento, a integração, a verificação, a validação, a implantação, a operação, a avaliação de desempenho, a melhoria e, por fim, o descarte de sistemas. São chamados, em alguns casos, de processos de engenharia de sistemas [16, 19, 30].

**Grupo de Processos de Projeto.** Este grupo de processos é responsável pelo gerenciamento das tarefas realizadas pelo grupo de processos técnicos ao longo do ciclo de vida. Por meio deles são planejadas, controladas, avaliadas, e monitoradas todas as tarefas presentes nas fases do CV. As decisões são tomadas com base na gestão de informação, de riscos, e de configuração.

A execução dos processos deste grupo promove as condições necessárias para a excelência e sustentabilidade dos resultados entregues pelos processos técnicos, garantindo, assim, a melhoria contínua por meio do monitoramento permanente do desempenho do sistema, do desempenho dos serviços de apoio, e do desempenho das ações de gestão.

---

<sup>20</sup> Nomes dos grupos de processos em português conforme tradução apresentada em 2009 pela versão brasileira da ISO/IEC/IEEE 15288:2008 [20]. Do original em inglês: *agreement processes, organizational project-enabling processes, technical management processes, and technical processes.*

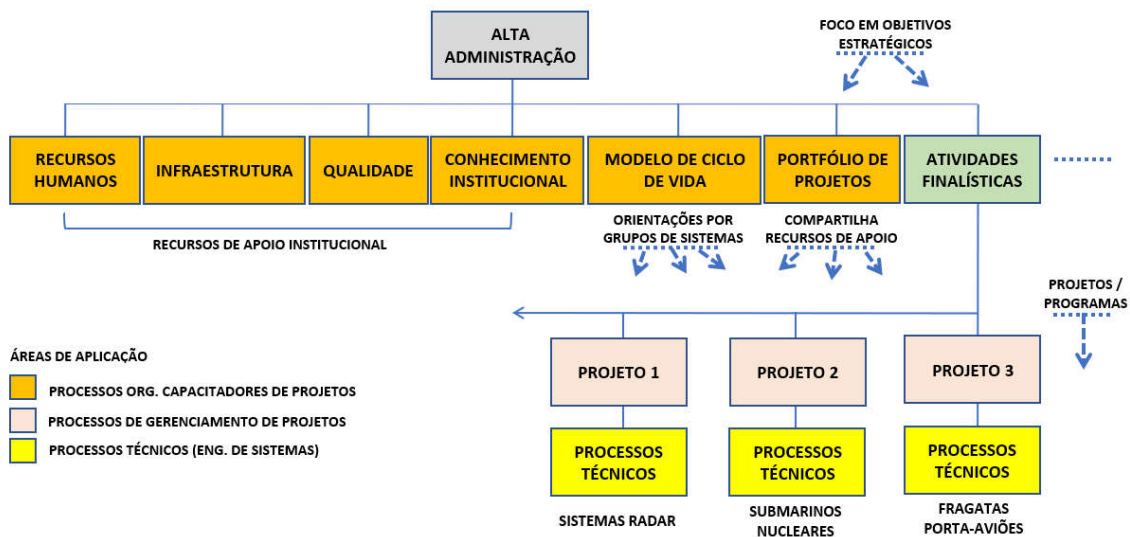


**Figura 22:** Processos do ciclo de vida de sistemas  
**Fonte:** Adaptado de ISO/IEC/IEEE 15288:2015[5]

**Grupo de Processos Organizacionais Capacitadores de Projeto.** Esse grupo de processos promove o compartilhamento sustentável de recursos institucionais garantindo pessoal, infraestrutura, finanças, e conhecimento necessários para viabilizar os projetos em andamento e atender aos objetivos estratégicos definidos.

Fazem parte desse grupo, atividades relacionadas com a gestão de infraestrutura, gestão de recursos humanos, gestão de qualidade, gestão de portfólio de projetos, gestão do modelo de ciclo de vida, e gestão de conhecimento. São atividades ligadas diretamente à alta administração que apoiam a consecução de projetos/programas relacionados com as atividades finalísticas da instituição.

Merecem destaque alguns processos deste grupo. O processo de gestão de conhecimento, que registra, cria e dissemina expertises relacionadas com as atividades finalísticas. O processo de gestão do modelo de CV, que estabelece procedimentos, normas e diretrizes relacionados à gestão do CV de grupos de sistemas. E o processo de gestão de portfólio de projetos, que estabelece procedimentos, normas e diretrizes relacionadas ao gerenciamento de projetos/programas, compartilhando de forma sustentável os recursos de apoio institucionais entre eles. A Figura 23 mostra as áreas institucionais onde esses processos são geralmente executados.



**Figura 23:** Áreas institucionais relacionadas com os processos organizacionais capacitadores de projetos

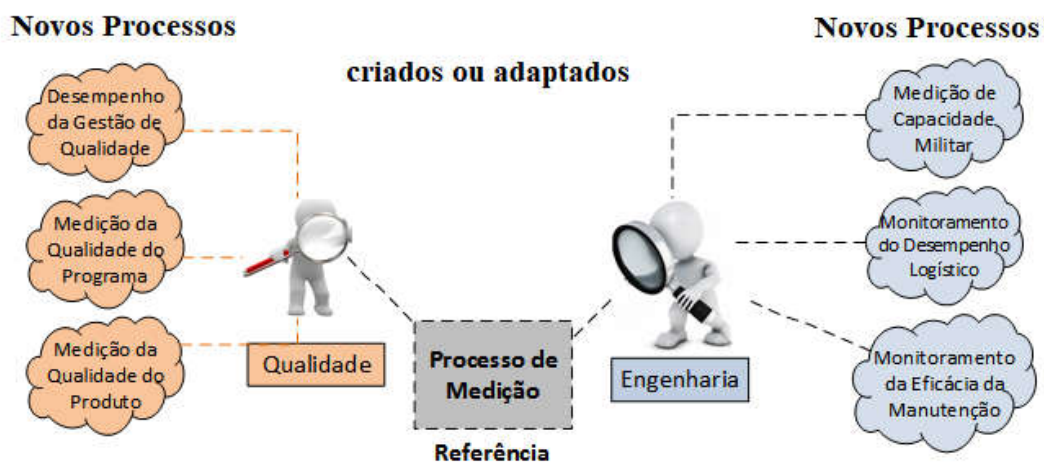
**Grupo de Processos Contratuais:** Os processos deste grupo realizam atividades e tarefas relacionadas com o fornecimento de serviços ou produtos, tanto interna quanto externamente à instituição. Eles estabelecem diretrizes, procedimentos e normas que orientam o estabelecimento de um acordo, podendo ser formal ou informal.

Da mesma forma que os grupos de processos técnicos e processos de gestão de projetos, os processos contratuais utilizam os processos organizacionais capacitadores de projeto para a formalização de acordos. É comum, especialmente no caso de sistemas de alta complexidade, a contratação de alguns serviços externos ao grupo de projeto para a realização de uma parte do sistema de interesse. Isso torna imprescindível a utilização dos processos desse grupo. Instituições que têm como atividade fim a prestação de serviços (ou fornecem produtos) utilizam os processos desse grupo para o atendimento de objetivos estratégicos.

Cabe aqui uma observação relevante. A ISO/IEC/IEEE 15288 [5] esclarece que a forma que ela apresenta esses processos pode, porventura, não atender 100% da aplicação que um determinado usuário necessita. Às vezes, dependendo das características do projeto/programa, para uma determinada aplicação pode ser necessário um conjunto de atividades específicas, que podem não ser encontradas de forma fechada em nenhum dos processos proposto pela norma. Por esta razão, a norma encoraja a adaptação, utilização, ou criação de novos processos. Contudo, ela destaca que aqueles processos do ciclo de vida podem ser utilizados como referência para a adaptação ou criação de novos processos. Veja a ilustração na Figura 24.

A Tabela 14 apresenta, como exemplo, um processo criado com a finalidade de monitorar os requisitos de desempenho de um sistema X. Foram utilizados como referência algumas atividades e tarefas de três processos da norma. São eles: o processo de análise de requisitos; o processo de implementação; e o processo de avaliação e controle de projeto.

Em resumo, a organização desses grupos de processos está relacionada com a evolução das estratégias utilizadas na gestão de um sistema ao longo dos tempos. Atualmente, tem sido considerado cada vez mais o valor ou a capacidade que um sistema pode entregar, e não somente o sistema por si só.



**Figura 24:** Ilustração da criação ou adaptação de novos processos tomando como referência o processo de medição. Na área de qualidade o processo de referência dá origem a processos que podem ser utilizados em contextos diferentes

Em busca da sustentabilidade do valor/capacidade que um sistema deve entregar, são estabelecidas condições e empregadas técnicas de gestão que permitam a este sistema entregar este valor/capacidade pretendido. Nesse contexto, os sistemas são considerados como ativos, necessitando de um sistema de gestão que promova a gestão<sup>21</sup> eficaz desses ativos.

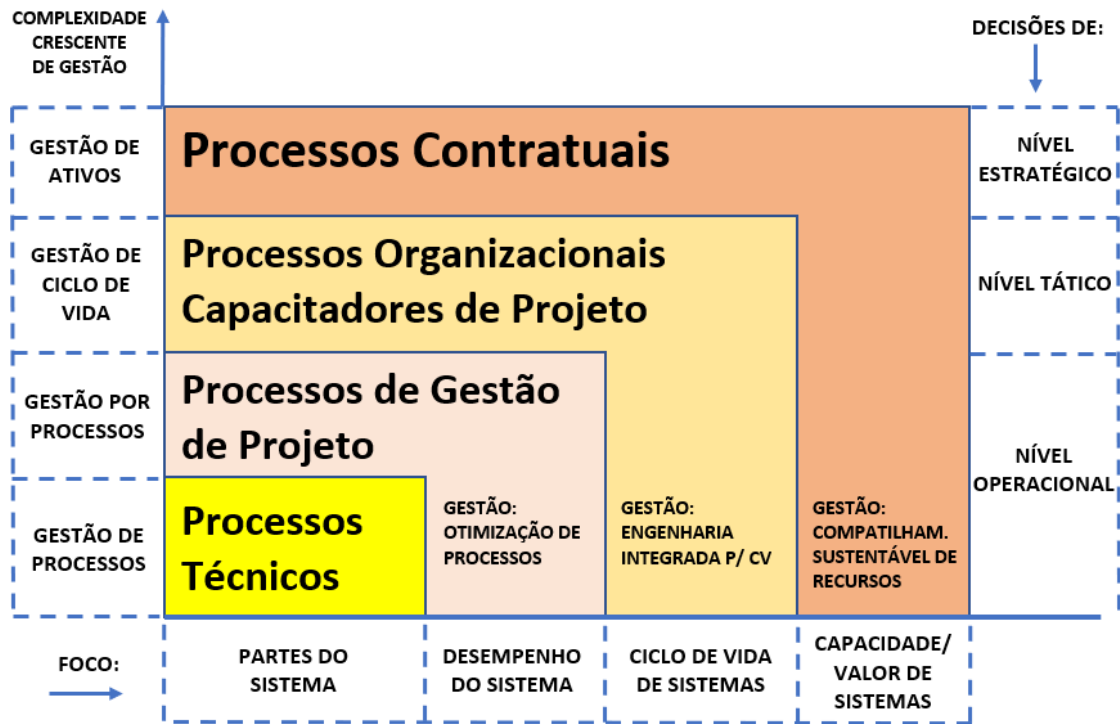
A ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5] não define qualquer tipo de hierarquia entre os processos por ela apresentados, sendo possível sua utilização em qualquer momento, e nos diferentes níveis da instituição.

A Figura 25 ilustra como esses processos podem ser organizados para auxiliar abordagens de gestão que visualizam o sistema com foco: em partes do sistema; no seu desempenho; no seu CV; e, na capacidade/valor entregue por ele. Essas abordagens estão relacionadas com a tomada de decisão em diferentes níveis da instituição.

<sup>21</sup> As normas da série ABNT NBR ISO 55000:2014 (55000, 55001 e 55002) apresentam uma visão geral de um sistema de ativo, estabelecendo seus requisitos e guia de implantação.

**Tabela 14:** Exemplo de processo criado tomando como referência a ISO/IEC/IEEE 15288:2015[5].

<b>Nome:</b> Processo de monitoramento de desempenho do sistema X.
<b>Finalidade:</b> Avaliar se os requisitos de desempenho do sistema X estão dentro dos limites estabelecidos, apontando possíveis desvios e propondo ações corretivas.
<b>Resultados esperados:</b> a) Os requisitos para serem monitorados são definidos; b) Medidas de desempenho para os requisitos a serem monitorados são selecionadas; c) As medidas de desempenho são continuamente monitoradas e comunicadas às partes interessadas.
<b>Atividades e tarefas:</b>  <b>Processo de análise de requisitos:</b> permite a seleção de medições para os requisitos de desempenho. Atividades e tarefas selecionadas:  a) Definir requisitos. Inclui as seguintes tarefas: 1. Definir as medidas técnicas e de qualidade que permitam julgar o cumprimento técnico. Isso inclui definir parâmetros de desempenho crítico associados com cada medida de eficácia identificada nos requisitos das partes interessadas. 2. Especificar os requisitos e funções do sistema, conforme justificado pela identificação de risco ou criticidade do sistema, que se relacionam com qualidades críticas, tais como saúde, segurança, proteção, confiabilidade, disponibilidade e suporte.  <b>Processo de implantação:</b> permite o registro de prova de que os requisitos são atendidos. Atividade e tarefa selecionadas:  b) Realizar a implantação. Inclui a seguinte tarefa: 1. Registrar as evidências objetivas de que os elementos do sistema cumprem os limites de desempenho estabelecidos em projeto.  <b>Processo de avaliação e controle de projeto:</b> apresenta uma monitoração de quais requisitos são cumpridos e comunica os resultados às partes interessadas. Atividades e tarefas selecionadas:  c) Avaliar o sistema X. Inclui as seguintes tarefas: 1. Analisar os resultados de medição, a fim de identificar variações ou desvios com relação aos valores planejados e fazer as recomendações apropriadas para as correções. 2. Fornecer relatórios de status periódicos e relatórios de desvios conforme estabelecido nas políticas e procedimentos internos.



**Figura 25:** Relacionamento dos grupos de processos da ISO/IEC/IEEE 15288 para realizar a gestão do ciclo de vida de sistemas (ativos)

### 3.6 Principais marcos do ciclo de vida de sistemas de defesa

Ao longo do CV de sistemas são realizadas muitas atividades e tarefas gerando informações e produtos que servem como insumos para outros processos. A finalização ou entrega de um desses produtos ou informações estão associados com momentos chave do CV. Por exemplo, a finalização da fase de produção, com a entrega do sistema de interesse e seus sistemas de apoio para o setor operativo.

Esses eventos chave são muito úteis para o gerenciamento das atividades ao longo do CV, pois permitem o controle e avaliação do andamento das tarefas realizadas por todos os envolvidos no projeto/programa. Isto torna possível a identificação de pontos fortes e de deficiências, e a tomada de decisões baseadas em riscos justificáveis.

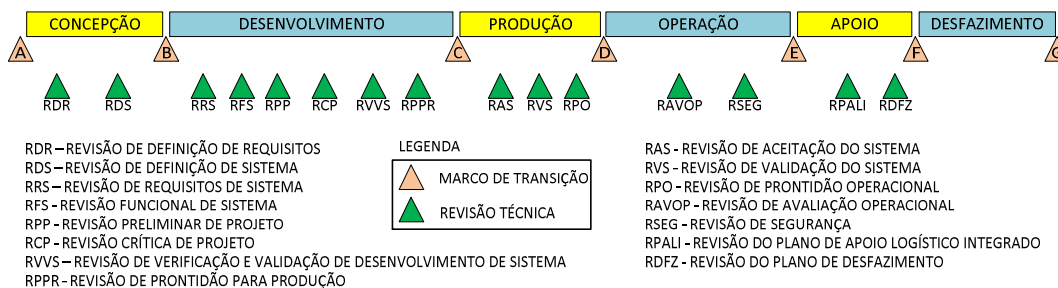
Em situações em que o grupo de projeto tem muitos envolvidos, como é o caso de projeto/programas de sistemas de defesa, esses eventos são uma ótima oportunidade de promover um alinhamento do andamento dos trabalhos entre as diversas equipes. Muitos gestores aproveitam esses momentos para também se comunicar com todo o projeto, propagando diretrizes e procedimentos.



Nos programas de defesa da NASA, os eventos que marcam e controlam a transição de fases do CV são chamados de Ponto de Decisão Chave<sup>22</sup> (KDP). Nos programas de defesa da OTAN, estes mesmos eventos são denominados de Porta de Decisão<sup>23</sup>. Utilizaremos neste trabalho o termo marco de transição para nos referirmos a esses eventos de transição de fases.

Esses marcos de transição são caracterizados por um propósito, critérios de entrada e critérios de saída (ou de sucesso). Os critérios de entrada constituem um conjunto de informações mínimas que permitem o início do processo de tomada de decisão. Os critérios de saída constituem os valores, ou condições, esperados para as informações avaliadas durante o processo de tomada de decisão.

Esses eventos chave, quando ocorrem internamente à fase, durante a sua realização, constituem marcos de controle interno (ou simplesmente, marcos). Geralmente, os marcos de controle internos são realizados por meio de revisões técnicas ou auditorias.



**Figura 26:** Ilustração dos principais marcos de transição e revisões técnicas dos programas de defesa da OTAN e da NASA

A Figura 26 mostra os principais marcos de transição e revisões técnicas dos programas de defesa da OTAN e da NASA, que possuem os seguintes propósitos:

**Revisão de Definição de Requisitos.** Propósito: revisar os requisitos operacionais elaborados, verificando o seu atendimento aos objetivos estabelecidos pela capacidade/necessidade operacional pretendida.

**Revisão de Definição de Sistema.** Propósito: revisar o projeto do sistema, examinando a arquitetura e o desdobramento funcional propostos para todos os elementos

<sup>22</sup> Do original em inglês *Key Decision Point*. (tradução do autor)

<sup>23</sup> Do original em inglês *Decision Gate*. (tradução do autor)

de sistema. Esta revisão técnica deve ser realizada ao final da fase de concepção e antes de iniciar a fase de desenvolvimento.

**Revisão de Requisitos de Sistemas.** Propósito: consolidar os requisitos de sistema, derivados da especificação preliminar do projeto conceitual, incorporando possíveis peculiaridades das partes interessadas a partir da assinatura do contrato de desenvolvimento, assegurando consistência e abrangência para prosseguir com a análise funcional, e alocação de requisitos, para os níveis subsequentes da estrutura hierárquica do sistema, quais sejam, elementos de sistema, estruturas, subsistemas, instalações e componentes. Ela deverá ser realizada no início da fase de desenvolvimento, e antes da realização das atividades de análise funcional do sistema.

**Revisão Funcional de Sistema.** Propósito: garantir que todos os requisitos de sistema, e requisitos de desempenho funcional, derivados da especificação preliminar do sistema, sejam consistentes com o orçamento, cronograma, risco, e outras restrições de sistema e do programa/projeto.

**Revisão Preliminar de Projeto.** Propósito: demonstrar que o projeto preliminar atende a todos os requisitos do sistema, com risco aceitável, dentro das restrições de cronograma e custo, e definir as bases necessárias para prosseguir com o detalhamento do projeto. Ao final desta revisão técnica, é aprovada a configuração de referência, e dada a autorização formal para prosseguir com o detalhamento de projeto.

**Revisão Crítica de Projeto.** Propósito: demonstrar que a maturidade do projeto é adequada para prosseguir com a fabricação em grande escala, montagem, integração e teste. Ao final desta revisão, são aprovados os planos de integração e verificação, e dada a autorização formal para continuar com a qualificação e testes do sistema.

**Revisão de Prontidão para Testes.** Propósito: assegurar a prontidão para a realização de testes do sistema, avaliando a consistência e abrangência de objetivos, do escopo, de métodos, de procedimentos, e da disponibilidade de recursos financeiros, materiais, e de pessoal.

**Revisão de Verificação e Validação do Desenvolvimento de Sistema.** Propósito: avaliar se o sistema desenvolvido satisfaz os requisitos da configuração funcional de

referência, mediante demonstração técnica realizada por meio da verificação e da validação de modelos e protótipos.

**Revisão de Prontidão para Produção.** Propósito: verificar se o projeto do sistema está pronto para ser produzido, certificando-se da existência de um planejamento para iniciar a produção em pequena (ou grande) escala. Esta revisão garante que os planos de produção, pessoal, e sistemas de apoio para fabricação, montagem, e integração, possuem maturidade para iniciar a produção. Essa revisão técnica é realizada durante o detalhamento final do sistema.

**Revisão de Aceitação do Sistema.** Propósito: verificar o nível de maturidade dos produtos finais do sistema<sup>24</sup>, avaliando sua conformidade com os requisitos estabelecidos pelas partes interessadas. Ao final desta revisão, há garantias que o sistema tem maturidade suficiente para iniciar a preparação para entrada em operação.

**Revisão de Validação do Sistema.** Propósito: avaliar procedimentos e características reais do sistema, incluindo elementos de sistema, garantindo que a documentação final do usuário/operador reflita precisamente o estado operacional declarado. Esta revisão técnica é realizada após as atividades de avaliação operacional contratual. Ao final desta revisão o sistema é entregue ao setor operativo.

**Revisão de Prontidão Operacional.** Propósito: verificar os resultados de testes, demonstrações, análises, e auditorias que garantam a prontidão operacional do sistema. Essa revisão técnica assegura que todos os sistemas de apoio estão disponíveis.

**Revisão de Avaliação Operacional.** Propósito: examinar os resultados de análises e testes operacionais relacionados com as características reais do sistema interesse, com a finalidade de garantir a sustentabilidade da sua capacidade operacional.

**Revisão Técnica de Segurança.** Propósito: avaliar o atendimento de requisitos de projeto relacionados com a preparação para desativação do sistema de interesse, com a finalidade de garantir a segurança do material, do operador, do público em geral e do meio ambiente.

---

<sup>24</sup> Engloba estruturas, subsistemas, instalações, componentes, equipamentos, bancadas de testes, ferramentas especiais, oficinas, planos de apoio logístico, procedimentos, processos, dados técnicos, bancos de dados, sistemas de TI, etc.

**Revisão do Plano de Apoio Logístico Integrado.** Propósito: examinar o conteúdo do Plano de Apoio de Logístico Integrado, verificando a sua aderência aos conceitos de ciclo de vida (apoio, desfazimento, manutenção, etc.), bem como o atendimento de requisitos de suportabilidade<sup>25</sup> do sistema.

**Revisão do Plano de Desfazimento.** Propósito: ratificar a decisão para desativar/descartar o sistema, e avaliar a prontidão para iniciar o processo de desfazimento.

O quantitativo de marcos de transição e revisões técnicas depende da natureza do sistema de defesa em questão, e do ambiente organizacional em que a gestão desse sistema é realizada. Eles são definidos durante a fase de concepção, como resultado do processo de planejamento de projeto.

---

<sup>25</sup> Característica intrínseca a um sistema e ao seu sistema de apoio, que indica o grau em que um sistema pode ser apoiado logisticamente pelo seu sistema apoio.

## Capítulo 4 - Apoio Logístico Integrado

Este capítulo tem por objetivo apresentar em linhas gerais as principais características da metodologia do Apoio Logístico Integrado (ALI).

### 4.1 Breve Histórico

O ALI surgiu na década de 60 nos programas de defesa dos EUA com o propósito de diminuir os custos de operação e manutenção de equipamentos e sistemas. Segundo Faria [33], isso aconteceu devido à ocorrência de falhas e inconvenientes relacionados ao reparo dos sistemas de alta complexidade.

A partir daí, a abordagem de ALI passou a ser considerada no planejamento logístico de novos sistemas, ganhando força em 1973 com a publicação da norma MIL-STD-1388-1 [34], pelo Departamento de Defesa (DOD) dos EUA. Esta norma estabeleceu diretrizes para a execução da Análise de Apoio Logístico (AAL)<sup>26</sup>.

Os fornecedores americanos de equipamentos rapidamente adotaram as diretrizes da norma ora estabelecida, ajustando seus processos de desenvolvimento com a finalidade de continuar atendendo a uma parcela considerável do mercado de defesa da época. Com o passar dos anos, a possibilidade de fornecimento para mercados de defesa fora do EUA cresceu cada vez mais. Isso demandou a necessidade do uso de uma base normativa que pudesse atender tanto o mercado interno quanto o externo.

Com a finalidade de promover o desenvolvimento da base industrial de defesa norte-americana, e continuar contando com a disponibilidade de fornecedores essenciais para os seus programas, o DOD cancelou em 1996 a MIL-STD-1388, publicando em 1997 um manual de aquisição logística, o MIL-HDBK-502<sup>27</sup>[35].

Em substituição à MIL-STD-1388, surgiram no mercado manuais e normas criados pela própria indústria. Esta nova base normativa<sup>28</sup> tem uma abordagem focada no

---

<sup>26</sup> A AAL é um processo estruturado e sistemático para aplicar os conceitos de ALI.

<sup>27</sup> Evoluiu em 2013 para a versão MIL-HDBK-502A [36], recebendo novo título, Manual de Análise de Apoio ao Produto.

<sup>28</sup> Por exemplo: GEIAHB007, GEIASTD007 e normas da Série S (S1000D, S3000L, etc.).

desenvolvimento de técnicas mais robustas<sup>29</sup> para o armazenamento e a transferência dos dados gerados pelo processo de AAL durante as fases de *design* de sistemas.

Atualmente, o ALI é considerado pela engenharia de sistemas com uma das expertises necessárias para o desenvolvimento de sistemas de alta complexidade, como é o caso de plantas de geração de energia e submarinos nucleares. Tem sido amplamente utilizado por desenvolvedores que necessitam projetar sistemas cada vez mais confiáveis e com custos de operação, manutenção e apoio viáveis.

#### **4.2 Definição de Apoio Logístico Integrado**

Um excelente ponto de partida para iniciar as discussões sobre a metodologia de ALI é a apresentação da definição do termo. A MIL-HDBK-502A [36] define ALI da seguinte forma:

Uma disciplina de gestão técnica multifuncional associada ao projeto, desenvolvimento, teste, produção, operação, manutenção, e melhoria, de sistemas economicamente viáveis, que atendem os requisitos de prontidão do usuário em tempo de paz e de guerra. Os principais objetivos da logística de aquisição são: (1) garantir que as considerações de apoio façam parte dos requisitos de projeto do sistema; (2) que o sistema possa ser economicamente apoiado ao longo do seu ciclo de vida; (3) e que os elementos de infraestrutura necessários para operação e apoio iniciais do sistema sejam identificados, desenvolvidos e adquiridos.

Essa definição decorre do entendimento que os custos envolvidos com as atividades que ocorrem após a entrega do sistema para o setor operativo (após o término da fase de produção), constituem boa parte do custo total de posse desse sistema. Para Candeias [37], estes valores podem exceder o custo total do projeto em mais de dois terços. Deste modo, torna-se necessária a incorporação de questões de suportabilidade ainda nas fases iniciais do projeto, a fim de que o apoio ao sistema seja economicamente viável.

De acordo com Côrtes *et al* [38], o ALI considera o sistema de apoio logístico como parte integrante do sistema, desde a sua fase de projeto conceitual e ao longo das demais fases que integram o seu ciclo de vida.

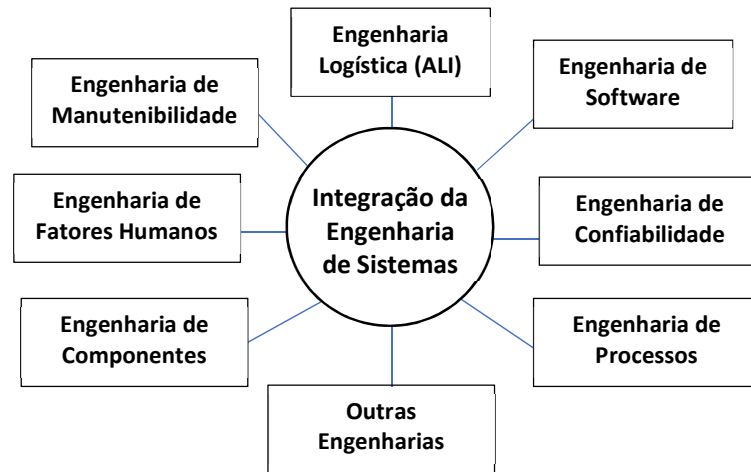
Para Cyrus *et al* [39], o ALI é uma filosofia de gestão que garante a integração de vários elementos de apoio. Se considerado durante a fase de planejamento de projeto, ele

---

<sup>29</sup> Por exemplo, o uso de padrão XML para transferência de dados, e de tabelas relacionais para o seu armazenamento.

pode ajudar na garantia que os sistemas planejados irão satisfazer eficazmente seus objetivos.

Atualmente a engenharia de sistemas considera o ALI como uma das disciplinas técnicas necessárias para o desenvolvimento de sistemas complexos cada vez mais eficientes. A Figura 27 apresenta algumas dessas disciplinas.



**Figura 27:** Integração de disciplinas de engenharia

**Fonte:** Adaptada de Blanchard [18]

De acordo com a NASA [23] (p.65), o objetivo das atividades de ALI dentro do processo de engenharia de sistemas é garantir que o sistema de interesse seja apoiado durante as fases de produção e de operação de modo eficaz no que se refere ao custo.

Para o INCOSE [21], o escopo completo do ALI inclui a aquisição logística (atividades que influenciam o projeto de um sistema, sua prontidão para utilização, e apoio) e a operação logística (atividades que garantem que os recursos e materiais certos, na quantidade e qualidade certas, estarão disponíveis no lugar certo e na hora certa ao longo das fases de operação, apoio e desfazimento).

O INCOSE [40] define a engenharia de sistemas da seguinte forma:

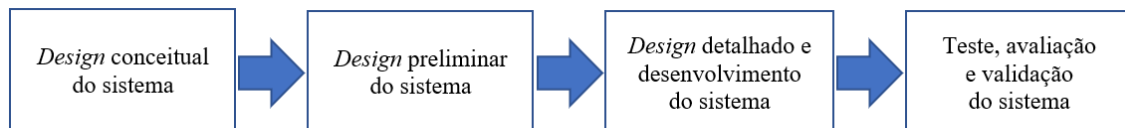
A engenharia de sistemas é uma abordagem multidisciplinar que possibilita a realização de sistemas bem-sucedidos. Ela foca na definição das necessidades do cliente, e nas funcionalidades requeridas no início do ciclo de desenvolvimento, documentando requisitos, e procedendo com a síntese do *design*, e validação do sistema, levando em consideração: operação, desempenho, teste, fabricação, treinamento, apoio, desativação, custo e cronograma. A engenharia de sistemas integra

todas as disciplinas e grupos de especialidades em uma equipe, formando um processo de desenvolvimento estruturado, que vai desde a concepção até a operação. Ela considera tanto as necessidades de negócio quanto as necessidades técnicas de todas as partes interessadas, com o objetivo de fornecer um produto de qualidade que atenda às necessidades do usuário.

Sob esta ótica, que considera o ALI como uma disciplina técnica que integra um processo de desenvolvimento estruturado, torna-se necessário ter uma visão geral desse processo. O processo de engenharia de sistemas será apresentado na próxima seção.

### 4.3 Processo de Engenharia de Sistemas

Para fins de suporte à discussão teórica, Blanchard [18] utiliza como referência para as fases de concepção, desenvolvimento e produção as etapas apresentadas na Figura 28 para um processo de engenharia de sistemas (PES):



**Figura 28:** Etapas do Processo de Engenharia de Sistemas para as fases de concepção, desenvolvimento e produção utilizado com referência por Blanchard [18]

As principais tarefas realizadas em cada uma dessas etapas são:

- a) *Design* conceitual do sistema. Inclui as seguintes tarefas:
  - i) Identificar problemas, e transformá-los na definição de uma necessidade que poderá ser atendida por um sistema.
  - ii) Realizar um planejamento detalhado para a obtenção do sistema que atenda à necessidade identificada.
  - iii) Conduzir uma análise de viabilidade que leve a uma definição da abordagem técnica para o design do sistema.
  - iv) Desenvolver os requisitos operacionais do sistema descrevendo as funções que o sistema deve realizar para atender à sua missão.
  - v) Propor o conceito de manutenção que irá apoiar o sistema ao longo do seu CV.
  - vi) Identificar e priorizar as medidas de desempenho técnico e os critérios de *design* associados.



- vii) Realizar a análise funcional para o nível mais alto da arquitetura (o próprio sistema), e alocar os requisitos para os vários subsistemas, prosseguindo, quando possível, para os níveis mais baixos da arquitetura.
  - viii) Realizar a análise do sistema e produzir estudos comparativos úteis.
  - ix) Desenvolver a especificação do sistema.
  - x) Conduzir uma revisão técnica do *design* conceitual.
- b) *Design* preliminar do sistema. Inclui as seguintes tarefas:
- i) Desenvolver os requisitos de *design* para subsistemas, e principais elementos de sistema, a partir dos requisitos do nível mais alto de sistema (o próprio sistema).
  - ii) Preparar as especificações de desenvolvimento, de produto, de processo e de material que são aplicáveis aos subsistemas (e principais elementos de sistema).
  - iii) Realizar a análise/alocação funcional para o nível de subsistema, e níveis mais baixos.
  - iv) Estabelecer os requisitos de *design* detalhado e desenvolver planos para sua alocação pelas disciplinas de engenharia.
  - v) Identificar e utilizar tecnologias e ferramentas de engenharia adequadas para o *design*.
  - vi) Conduzir estudo comparativos que visem tanto a eficácia operacional quanto a eficácia do *design*.
  - vii) Conduzir revisões técnicas de *design* de acordo com o cronograma de projeto.
- c) *Design* detalhado, e desenvolvimento do sistema. Inclui as seguintes tarefas:
- i) Desenvolver os requisitos de *design* para todos os componentes pertencentes ao nível mais baixo da arquitetura.
  - ii) Implantar as atividades técnicas necessárias para atender a todos os objetivos do *design*.
  - iii) Integrar atividades e elementos de sistema.
  - iv) Utilizar métodos e ferramentas de *design*.
  - v) Preparar a documentação e os dados de *design*.
  - vi) Desenvolver modelos de engenharia e protótipos.
  - vii) Implantar um meio para revisar, avaliar e compartilhar boas práticas de *design*.
  - viii) Incorporar as alterações de *design* quando necessário.
- d) Teste, avaliação e validação do sistema. Inclui as seguintes tarefas:

- i) Determinar os requisitos para teste, avaliação e validação do sistema.
- ii) Descrever as categorias de avaliação e teste do sistema.
- iii) Preparar o teste e avaliação do sistema.
- iv) Conduzir o teste do sistema, coletando seus resultados, e preparar relatório de testes.
- v) Incorporar modificações de sistema quando necessário.

As três primeiras etapas do processo estão relacionadas com o *design* dos elementos de sistema nos níveis de sistema, subsistema, e componente, respectivamente. A última etapa está relacionada com a produção desses elementos de sistema. Para a realização das atividades do processo de engenharia de sistemas apresentadas acima, podem ser utilizados os processos técnicos da ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5] apresentados na Figura 22.

Essas tarefas são realizadas ao longo do CV conforme apresentado na Figura 29.

PRÉ-CONCEPÇÃO	CONCEPÇÃO	DESENVOLVIMENTO		PRODUÇÃO	OPERAÇÃO & APOIO	DESFAZIMENTO
Identificação de Necessidade	<i>Design</i> conceitual do sistema	<i>Design</i> preliminar do sistema	<i>Design</i> detalhado e desenvolvimento do sistema	Produção, teste, avaliação e validação do sistema		

**Figura 29:** Processo de Engenharia de Sistemas realizado durante as fases de concepção, desenvolvimento e produção

Todas as disciplinas de engenharia, que integram a engenharia de sistemas (ver Figura 27), atuam concorrentemente ao longo das fases do CV auxiliando a realização de cada uma das tarefas que pertencem ao processo de engenharia de sistemas.

De posse dessa visão geral do processo de engenharia de sistemas ao longo das fases, é possível apresentar como o ALI se organiza para contribuir com a consecução desse processo como um todo.

#### 4.4 Processo de Apoio Logístico Integrado

Esta seção apresenta uma visão geral do processo de ALI com suas principais tarefas, métodos e procedimentos. Para efeitos didáticos, será apresentado o processo de ALI conforme definido pela MIL-STD-1388-1A [41]. Quando necessário, será indicado ao longo do texto como outras referências executam uma parte específica deste processo.

O processo de ALI compreende as atividades e tarefas necessárias para se realizar uma Análise Apoio Logístico (AAL). A AAL é uma forma estruturada e sistemática de aplicação dos conceitos, ideias, métodos e práticas abordados pela disciplina técnica ALI, a qual possui definição apresentada na Seção 4.2.

A MIL-STD-1388-1A [41] define a AAL da seguinte forma:

Uma análise sistemática e abrangente que deve ser conduzida de forma iterativa em todas as fases do ciclo de vida do sistema/equipamento para satisfazer a suportabilidade (a suportabilidade inclui todos os elementos de ALI, conforme definido pela DoDI 5000.2<sup>30</sup> necessários para operar e manter o sistema/equipamento).

É comum encontrar na literatura uma pluralidade de termos tanto para se referir à disciplina técnica que aplica o ALI, quanto para o processo que o realiza. A Tabela 15 reúne alguns termos que podem ser usados com essa finalidade.

**Tabela 15:** Termos utilizados para se referir ao ALI e ao processo de ALI

<b>Disciplina Técnica “ALI”</b>	<b>Processo de aplicação do “ALI”</b>
<b>Termos correlatos:</b> - Engenharia Logística - Apoio Logístico Integrado - Logística Integrada - Engenharia de Apoio/Suporte - Engenharia de Ciclo de Vida - Engenharia de Suportabilidade - Apoio Integrado ao Produto - Etc.	<b>Termos correlatos:</b> - Processo de ALI - Processo de AAL - Análise de Apoio Logístico (AAL) - Análise de Suportabilidade - Processo de Suportabilidade - Processo de Apoio/Suporte - Análise de Apoio ao Produto. - Etc.

O processo de ALI compreende cinco grupos de atividades, que por sua vez compreendem um conjunto de tarefas. As atividades são identificadas por um conjunto de números, quais sejam: 100, 200, 300, 400 e 500. As tarefas pertencentes a um grupo de atividades seguem a numeração deste grupo. Por exemplo, a atividade do grupo 100 inclui as tarefas 101, 102 e 103 (vide Tabela 16 ).

<sup>30</sup> Instrução de operação do sistema de aquisição de defesa do DOD dos EUA.

**Tabela 16:** Tarefas do processo de ALI. **Fonte:** MIL-STD-1388-1A [41]

<p><b>Atividades:</b></p> <p><b>100- Planejamento e controle do programa.</b> Inclui as tarefas: 101- Desenvolvimento da estratégia inicial de AAL. 102- Plano de AAL 103- Programa e revisões técnicas</p> <p><b>200 - Definição do sistema principal e do sistema de apoio.</b> Inclui as tarefas: 201- Estudo de uso 202- Padronização do sistema e do sistema de apoio 203- Análises comparativas 204- Oportunidades tecnológicas 205- Fatores de suportabilidade para o sistema e o sistema de apoio</p> <p><b>300 - Preparação e avaliação de alternativas.</b> Inclui as tarefas: 301- Identificação de requisitos funcionais 302- Alternativas para o sistema de apoio 303- Avaliação de alternativas e análises comparativas</p> <p><b>400 - Determinação de requisitos dos elementos logísticos.</b> Inclui as tarefas: 401- Análise de tarefas 402- Análise de impacto da operação do novo sistema 403- Análise do apoio pós-produção</p> <p><b>500 - Avaliação de suportabilidade.</b> Inclui as tarefas: 501- Teste, avaliação e verificação de suportabilidade</p>
--

O processo de ALI é utilizado para atender aos objetivos de suportabilidade relacionados com as fases do CV (ver Figura 30). Suas tarefas são distribuídas pelas fases do CV conforme mostrado pela Figura 31. Ele é aplicado com abordagem iterativa (em busca da solução ótima), e de forma *top-down*<sup>31</sup>.

As tarefas do processo de ALI com mais relevância para o desenvolvimento deste trabalho serão discutidas a seguir.

As tarefas do grupo 100 estão sob a responsabilidade do gerente de ALI. Ele utiliza as tarefas desse grupo para organizar o trabalho da equipe de ALI ao longo das fases do CV, estabelecendo um plano de gerenciamento das atividades de ALI (PGALI). A primeira

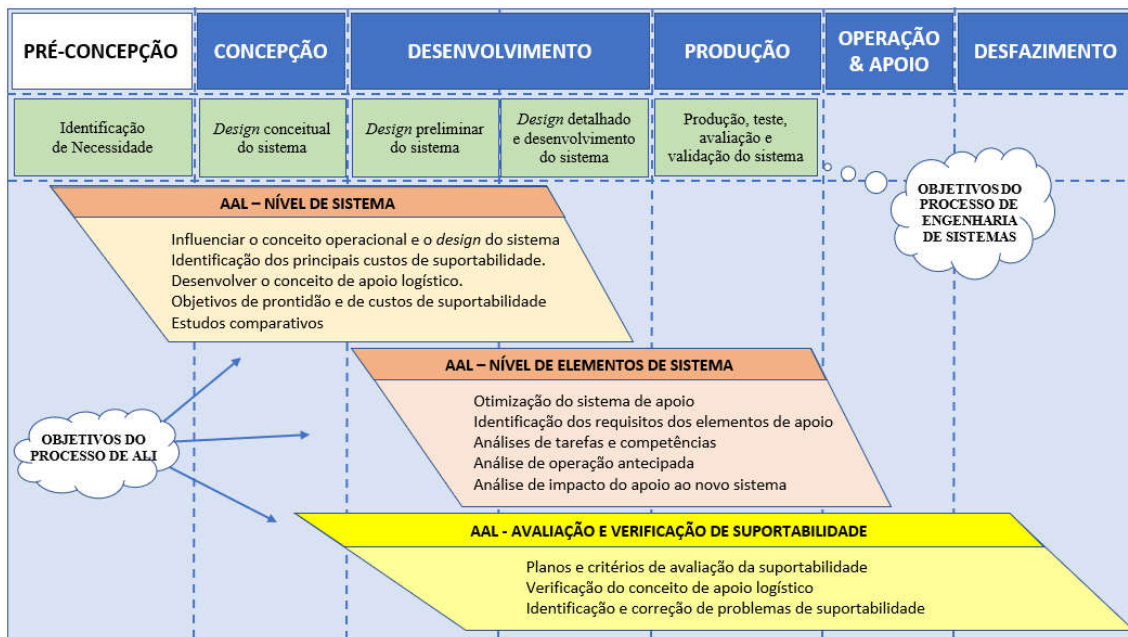
---

<sup>31</sup> Inicia no nível mais alto da arquitetura (o próprio sistema), passando pelo nível intermediário (os subsistemas), até o nível mais baixo (os componentes).

versão do PGALI é feita na fase de concepção, sendo revisado e atualizado por ocasião do início das fases subsequentes do CV.

O gerente de ALI trabalha diretamente subordinado ao gerente do projeto/programa e no mesmo nível do gerente de engenharia de sistemas. Cabe pontuar que o gerente de ALI assegura a participação de representantes da equipe de ALI nas revisões técnicas de *design* definidas pelo gerente do projeto.

A revisão técnica do Plano de Apoio Logístico Integrado (RPALI, ver Figura 26) divide o CV com relação às atividades de ALI em dois grupos. O primeiro, formado pelas fases de concepção, desenvolvimento e produção, contempla o planejamento da suportabilidade. E o segundo, formado pelas fases de operação, apoio e desfazimento, contempla a execução, avaliação e, sobretudo, a atualização do ALI planejado para o sistema.



**Figura 30:** Objetivos de suportabilidade por fases do CV realizados pelo processo de ALI  
**Fonte:** Adaptado de MIL-STD-1388-1A [41]

PRÉ-CONCEPÇÃO	CONCEPÇÃO	DESENVOLVIMENTO	PRODUÇÃO	OPERAÇÃO & APOIO	DESFAZIMENTO
	Tarefa 101				
	Tarefa 102				
	Tarefa 103				
	Tarefa 201				
	Tarefa 202				
	Tarefa 203				
	Tarefa 204				
	Tarefa 205				
	Tarefa 301				
	Tarefa 302				
	Tarefa 303				
	Tarefa 401				
	Tarefa 402				
			Tarefa 403		
	Tarefa 501				

**Figura 31:** Tarefas do processo de ALI por fases do CV. **Fonte:** Adaptado de MIL-STD-1388-1A [41].

As tarefas do grupo 200 são utilizadas para definir as características do sistema principal e do sistema de apoio. Entende-se que o sistema principal é aquele que atende à missão primária do sistema de defesa. Por exemplo, designando ao sistema de defesa da Figura 13 a missão primária “patrulha do litoral brasileiro”, tem-se o submarino nuclear como seu sistema principal. Nesse mesmo exemplo, o sistema de apoio auxilia o sistema principal no atendimento da missão primária.

Cabe ressaltar um ponto muito importante a respeito do desenvolvimento de sistemas. Para o atendimento da missão primária, o PES “enxerga”, em um primeiro momento, o sistema como uma “caixa preta”. Neste momento não se sabe ainda como é a constituição dessa caixa preta. Após as primeiras análises da missão, o PES propõe para esta caixa preta um sistema de defesa que possui na sua constituição um sistema principal e um de apoio. A partir desse ponto, o PES tem que desenvolver a caixa preta “sistema principal” e a caixa preta “sistema de apoio”.

O desenvolvimento do “sistema principal” e do “sistema de apoio” tem igual importância para o atendimento pleno da missão primária. O processo de ALI participa/contribui com o desenvolvimento do “sistema principal” influenciando suas características de confiabilidade e manutenibilidade. E tem participação direta no

desenvolvimento do “sistema de apoio”, definindo, dentre outros requisitos, detalhamento funcional, métricas de desempenho, métodos de integração, de teste e de avaliação.

Os estudos de uso do sistema são realizados pela tarefa 201 utilizando como dado de entrada o conceito operacional, de apoio logístico e de manutenção (ver item 3.3). Para um sistema de defesa como o da Figura 13, são identificadas e detalhadas, por exemplo, as seguintes informações:

- a) tempo de vida útil do sistema;
- b) perfil de utilização anual; (define a alocação temporal das operações e das manutenções);
- c) perfil de operação/missão (tempo total da missão, tempo de patrulha, tempo de trânsito até o local de patrulha);
- d) locais de operação;
- e) locais de manutenção (estaleiros, bases navais, instalações de fornecedores, instalações de outra Força Armada, etc.);
- f) condições do reator;
- g) instituições que operam, realizam a manutenção e apoiam o sistema;
- h) tipo e duração dos períodos de manutenção; e
- i) tipos de manutenção (preventiva, corretiva, preditiva, testes, inspeções, etc.)

A tarefa 202 define restrições de suportabilidade para o sistema de apoio e para o sistema principal. Estas restrições levam em consideração os recursos de apoio logístico (existentes e novos) que possuem maior benefício em termos de custo, mão-de-obra, prontidão, ou políticas de apoio. Para um sistema de defesa como o da Figura 13, são identificadas e detalhadas, por exemplo, as seguintes informações:

- a) Processos de monitoramento de desempenho de equipamentos de segurança nuclear;
- b) Equipamentos/manutenções que devem ser realizadas pelo fabricante ou pela própria instituição;
- c) Participação ou não da tripulação em atividades de manutenção;
- d) Equipamentos que terão manutenção no interior do submarino ou em oficina;
- e) Abordagem de gestão de manutenção (processos, métodos e procedimentos);

- f) Abordagem de manutenção para equipamentos críticos (inspeção, preditiva, preventiva, corretiva, etc.);
- g) Acessos (escotilhas, portas, etc.), rotas de embarque/desembarque de material, e áreas de manutenção ao redor de equipamentos a bordo do submarino;
- h) Disponibilidade de recursos de apoio (eletricidade, gases, fluidos, etc.) por locais de operação do submarino (dique, cais, base naval, no mar, etc.).
- i) Tempo limite de retorno à capacidade operacional plena (é o tempo necessário para restabelecer a condição operacional plena de um submarino que está sob intervenção de manutenção).
- j) Preservação passiva de equipamentos críticos.

Os resultados dos estudos de uso realizados pela tarefa 201 e as principais características definidas para o sistema de defesa (submarino + sist. de apoio) realizadas pela tarefa 202 são otimizadas por meio da tarefa 203. Esta otimização é feita por meio de várias análises comparativas onde são realizados julgamentos de viabilidade dos parâmetros de suportabilidade para o novo sistema. Essas análises utilizam como referência, por exemplo, sistemas existentes, sendo possível determinar os principais fatores de suportabilidade, custo e prontidão para o novo sistema.

Para auxiliar as análises comparativas feitas pela tarefa 203, são identificados os elementos de arquitetura que impactam de forma significativa o ciclo de vida do sistema de interesse. Estes elementos acabam por definir uma arquitetura-referência para as análises comparativas. Um elemento de arquitetura deve ser incluído na arquitetura-referência se, por exemplo: impacta de forma significativa os custos de operação/manutenção, e a disponibilidade do sistema; exige grandes infraestruturas de manutenção; exige mão de obra especializada para manutenção e apoio logístico.

A Tabela 17 reúne alguns elementos de arquitetura do submarino nuclear que podem ser considerados em análises comparativas.



**Tabela 17:** Exemplos de elementos de arquitetura que podem ser considerados em análises comparativas de suportabilidade para um submarino nuclear.

<b>Elemento de Arquitetura</b>	<b>Justificativa</b>
Casco do submarino	Algumas inspeções na parte inferior do casco demandam que o submarino seja docado em dique <sup>32</sup> seco. (ver fig. 32)
Ampolas de ar	As ampolas de ar dos tanques de lastro responsáveis pelo retorno do submarino à superfície necessitam de requalificação periódica. Esse tipo de inspeção necessita de dique seco para acesso e/ou retirada dessas ampolas.
Reator nuclear	As inspeções no compartimento do reator e as trocas de combustível nuclear impactam a disponibilidade do submarino, além de demandar infraestrutura de apoio significativa (piscina para combustível usado, diques secos, cais, e outros serviços de terra, tais como, energia e gases.).
Sistema de controle da planta nuclear e da plataforma.	Os sistemas de controle possuem equipamento que demandam elevada especialização dos recursos de manutenção e de apoio logístico. A melhor estratégia de abordagem para cada equipamento envolve a definição do tipo de manutenção e de quem irá realizá-la, podendo ser a própria instituição ou prestadores de serviços externos.
Gerador diesel de emergência	As grandes manutenções corretivas no gerador diesel impactam a disponibilidade e influenciam o ciclo operativo do submarino.
Baterias	A troca da bateria ao final da sua vida útil exige a docagem do submarino para a sua retirada. Os testes de carga da bateria exigem um conjunto de resistores para dissipação de carga fora do submarino.
Turbinas a vapor	Algumas atividades de manutenção (inspeções e corretiva) exigem a parada do submarino e demandam, por vezes, a mão de obra do próprio fabricante.
Motor elétrico de principal (ver fig. 33)	A revisão geral do motor elétrico principal necessita que algumas partes sejam retiradas de dentro do submarino, impactando a disponibilidade global do sistema.
Quadros de distribuição elétrica	A inspeção geral dos quadros elétricos impacta a disponibilidade e influencia a definição do ciclo de operação do submarino.

<sup>32</sup> Estrutura fixa ou móvel, semelhante a uma piscina, que permite a retirada total de um submarino (ou outro navio) do contato com a água. Podem ser fixos (localizados em estaleiro ou base naval) ou móveis (dique flutuante). Denomina-se o processo de entrada ou retirada de um submarino do interior de um dique de *processo de docagem*. Diz-se para um submarino que está no interior de um dique que ele está *docado*.



**Figura 32:** Submarino Timbira (convencional, classe tupi) docado na Base Naval do Rio de Janeiro (março/2009).

**Fonte:** PODER NAVAL [42]



**Figura 33:** Motor elétrico principal de um submarino convencional construído pela empresa Navantia. **Fonte:** NAVAL TECHNOLOGY [43].

As tarefas do grupo 300 são responsáveis pela definição das funções e requisitos dos elementos do sistema de apoio, promovendo por meio de análises comparativas a melhor solução de apoio logístico para o novo sistema.

A tarefa 301 fica responsável pela determinação das funções operacionais, de manutenção e de apoio logístico para cada elemento/equipamento do novo sistema. Estas funções são documentadas em um inventário de funções. Para cada uma das funções deste inventário, são definidos requisitos de operação, de manutenção e de apoio logístico.

A identificação de requisitos funcionais realizada pela tarefa 301 abrange todos os níveis da arquitetura do sistema. Por exemplo, para o nível de equipamento, a Tabela 18 apresenta possíveis requisitos funcionais para o painel de controle do motor elétrico principal (MEP) de um submarino nuclear. Como exemplo para o nível de subsistemas, a Tabela 19 apresenta possíveis requisitos funcionais para uma Instalação Propulsora Nuclear (IPN)<sup>33</sup> de um submarino de propulsão nuclear.

Uma vez estabelecidos os requisitos funcionais de operação, manutenção e de apoio logístico, a tarefa 302 identifica possíveis soluções para o atendimento desses requisitos, e

<sup>33</sup> Designação proposta por GUIMARÃES [52] para se referir a uma planta de geração de energia nuclear embarcada em um submarino de propulsão nuclear.

a tarefa 303 avalia a solução mais adequada por meio de estudos comparativos que levam em consideração as restrições impostas pelos conceitos operacional, de manutenção, e de apoio logístico definidos para o sistema em questão. A Tabela 20 apresenta um exemplo de análise comparativa de custo entre as possíveis soluções para operação, manutenção e apoio logístico para o painel de controle do MEP.

**Tabela 18:** Exemplo de requisitos funcionais de operação, de manutenção e de apoio logístico para o painel de controle do MEP

Equipamento	Função do equipamento	Função operacional, de manutenção, e de apoio logístico.	Requisitos funcionais
Painel de controle do Motor Elétrico Principal (MEP)	Permitir o controle do MEP, servindo como interface entre o operador e o motor.	<b>Operação:</b> Operar o MEP por meio do seu painel de controle, monitorando as condições limite de potência e refrigeração para cada configuração permitida.	<b>Operação:</b> O painel de controle do MEP deverá apresentar os parâmetros de potência, de refrigeração, e os limites operacionais para cada configuração possível.
		<b>Manutenção:</b> Executar rotina de auto teste do painel de controle do MEP verificando suas principais funcionalidades.	<b>Manutenção:</b> A rotina de auto teste do painel de controle do MEP deverá testar suas funções principais, e identificar as condições que levam a sua substituição.
		<b>Apoio Logístico:</b> Armazenar e disponibilizar painéis de controle do MEP sobressalentes para substituição em caso de avaria.	<b>Apoio Logístico:</b> Armazenar, manusear, e transportar os painéis de controle do MEP conforme orientações do fabricante.

As tarefas do grupo 400 são responsáveis pela definição de requisitos para os elementos de sistema responsáveis pelo apoio logístico do novo sistema. Esses elementos de sistema também são chamados de elementos de apoio.

**Tabela 19:** Exemplo de requisitos funcionais de operação, de manutenção e de apoio logístico para uma instalação propulsora nuclear de um submarino nuclear

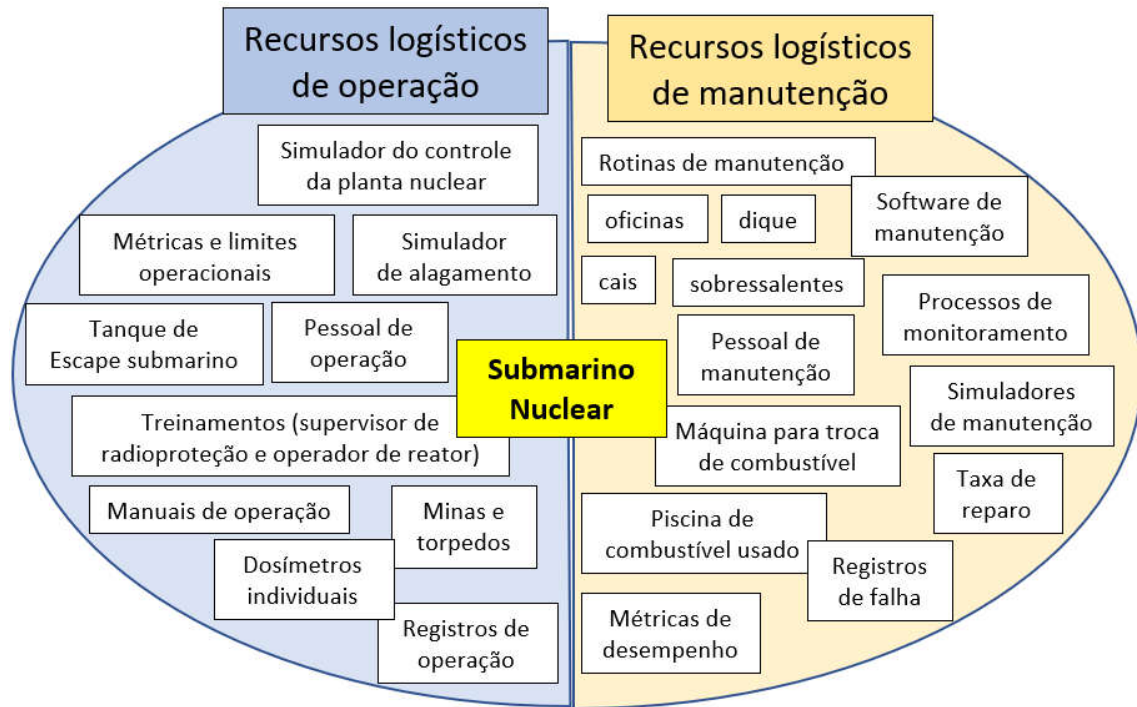
Equipamento	Função do equipamento	Função operacional, de manutenção, e de apoio logístico.	Requisitos funcionais
Instalação Propulsora Nuclear (IPN) de um Submarino de propulsão nuclear	Promover a transferência de calor entre o circuito primário e o circuito secundário de uma planta de geração de energia nuclear para a alimentar as turbinas do sistema de propulsão de um submarino.	<b>Operação:</b> Operar os subsistemas e equipamentos da IPN dentro dos limites de projeto a fim de garantir disponibilidade e segurança.	<b>Operação:</b> Definir os parâmetros operacionais (vibração, tensão, corrente, vazão, etc.) e desempenho associado de cada um dos subsistemas e equipamentos da IPN a fim de garantir a disponibilidade e segurança desejadas.
		<b>Manutenção:</b> Realizar rotinas de manutenção garantindo que subsistemas e equipamentos da IPN desempenhem de forma continuada suas funções de projeto.	<b>Manutenção:</b> Definir rotinas preventivas e corretivas de manutenção para os subsistemas e equipamentos da IPN.
		<b>Apoio Logístico:</b> Monitorar a eficácia da manutenção da IPN avaliando se os parâmetros operacionais de subsistemas e equipamentos permanecem dentro dos limites de projeto.	<b>Apoio Logístico:</b> Definir e implantar um processo que monitore a eficácia da manutenção de subsistemas e equipamentos de uma IPN.

**Tabela 20:** Exemplo de análise comparativa de custo entre as possíveis soluções para operação, manutenção e apoio logístico do painel de controle do MEP

Painel de controle do MEP	Possíveis soluções			
	A: Própria instituição	B: Serviço terceirizado	C: Opção mais barata	D: Opção escolhida
Operação	\$ 7	\$ 2	\$ 2	\$ 7*
Manutenção corretiva	\$ 5 (duração: 3h)	\$ 2 (duração: 9h)	\$ 2	\$ 5 (menor duração)
Manutenção preventiva	\$ 4	\$ 1	\$ 1	\$ 1
Apoio logístico	\$ 1	\$ 3	\$ 1	\$ 1
<b>Total por opção:</b>	\$ 17	\$ 8	\$ 6	\$ 14

\*Decisão estratégica de operação pela própria instituição registrada no conceito operacional.

A tarefa 401 realiza a análise das funções de operação e de manutenção identificadas pela tarefa 301, definindo requisitos para os recursos de apoio logístico relacionados tanto com a operação quanto com a manutenção. A Figura 34 apresenta, como exemplo, recursos logísticos relacionados com a manutenção e com a operação de um submarino com propulsão nuclear.



**Figura 34:** Exemplos de recursos logísticos relacionados com a operação e com a manutenção de um submarino nuclear

A MIL-STD-1388-1A [41] propõe que todos os recursos de apoio logístico necessários para apoiar as atividades de operação, manutenção e apoio logístico de um sistema pode ser organizado nos seguintes elementos logísticos:

- a) **Plano da Manutenção:** Define a abordagem, rotinas e pessoal de manutenção para o sistema.
- b) **Mão de obra e pessoal:** Define as competências (conhecimento, habilidade e atitude) e carga de trabalho (homem-hora) do pessoal envolvido na operação, manutenção e apoio logístico do sistema.
- c) **Apoio ao abastecimento:** Identifica itens (equipamentos, sobressalentes, consumíveis, etc.) e define a estratégia de fornecimento para as atividades de operação, de manutenção e de apoio logístico.

- d) **Equipamento de apoio e teste:** Identifica e reúne todas as informações relacionadas aos equipamentos que apoiam as atividades de operação, manutenção e apoio logístico.
- e) **Treinamento e equipamentos de treinamento:** Define os treinamentos e recursos de treinamentos para o pessoal envolvido na operação, na manutenção e no apoio logístico ao sistema.
- f) **Documentação técnica:** Define a documentação técnica, suficiente e necessária, para a consecução da operação, da manutenção e do apoio logístico do sistema.
- g) **Recursos computacionais:** Define os recursos computacionais necessários para apoiar a consecução das atividades de operação, de manutenção e de apoio logístico do sistema de interesse.
- h) **Acondicionamento, manuseio, armazenagem e transporte (PHST<sup>34</sup>):** Define os procedimentos necessários para acondicionar, manusear, armazenar e transportar itens (equipamentos, sobressalente, consumíveis, etc.) relacionados com as atividades de operação, manutenção e apoio logístico durante as fases de produção, operação, apoio e desfazimento do sistema de interesse.
- i) **Infraestrutura:** Define oficinas, simuladores, e outras infraestruturas necessárias para apoiar a operação, a manutenção e o apoio logístico do sistema de interesse.
- j) **Gerenciamento do Apoio Logístico:** Organiza as atividades de desenvolvimento e execução do apoio logístico durante as fases de aquisição (concepção até a produção) e de utilização (operação, apoio e desfazimento) do sistema de interesse.

Adicionalmente a esses 10 elementos logísticos, a Universidade de Aquisição de Defesa [44] dos EUA considera ainda mais dois elementos, são eles:

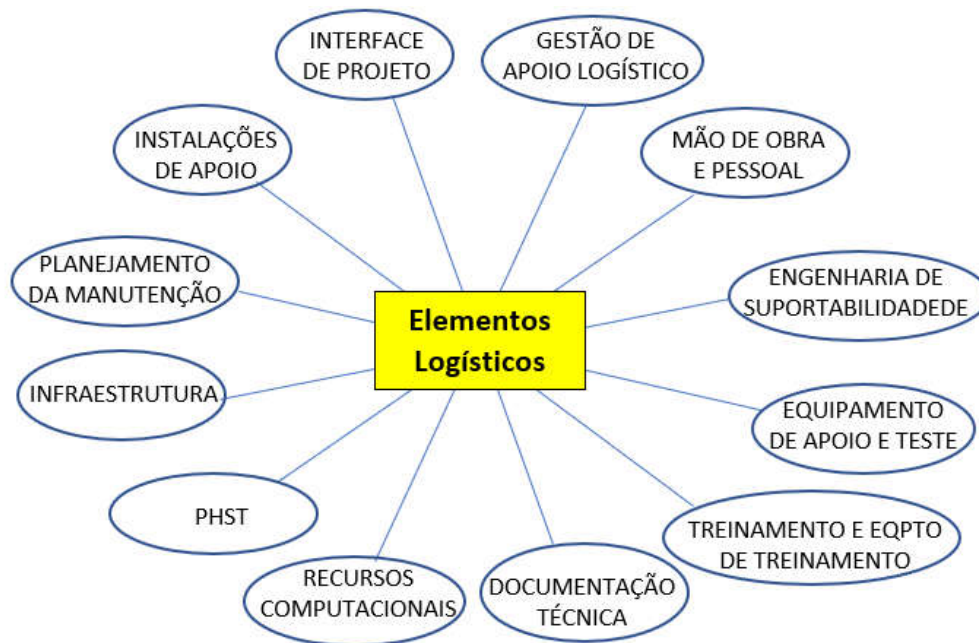
- k) **Engenharia de Suportabilidade:** Engloba análises e investigações de engenharia e de logística para garantir de forma continuada a operação e a manutenção de um sistema com risco gerenciado. Isto inclui, dentre outros: registro e triagem de dados de manutenção e serviços de apoio; análise de causa raiz de problemas de apoio logístico (perigos operacionais, obsolescência de itens, efeitos de corrosão, e degradação de confiabilidade); e

---

<sup>34</sup> Acrônimo para *packing, handling, storage and transportation*.

- 1) **Interface de projeto (*design*):** promove a integração entre as características quantitativas da engenharia de sistemas (confiabilidade, manutenibilidade, ergonomia, etc.) e os outros elementos logísticos.

Para o caso do submarino de propulsão nuclear, a utilização da metodologia de ALI reuniria nesses 12 elementos logísticos um conjunto de dados técnicos, necessários e suficientes, para a realização dos diversos processos e atividades durante as fases de operação, apoio e desfazimento. A Figura 35 ilustra esses 12 elementos logísticos relacionados com o desenvolvimento de um sistema de interesse.



**Figura 35:** Ilustração dos 12 elementos logísticos apontados pela Universidade de Aquisição de Defesa [44]

A tarefa 501 avalia o cumprimento de requisitos específicos de apoio logístico, identificando as razões para possíveis desvios de projeto, definindo métodos para a correção de deficiências buscando melhorar a prontidão do sistema.

#### 4.5 Produtos Logísticos

O resultado final do processo de AAL durante as fases de aquisição do sistema de interesse (concepção, desenvolvimento e produção) são chamados de produtos logísticos. Cada produto logístico está relacionado com os doze elementos de apoio ilustrado na Figura 35.

A eficiência das atividades e processos executados na pós-produção do sistema (operação, apoio e desfazimento) está diretamente associada com a qualidade dos produtos logísticos associados a cada um desses 12 elementos de apoio. No Apêndice B, a Tabela 40 apresenta os objetivos, e principais produtos logísticos, associados a cada um desses elementos de apoio.

#### **4.6 Banco de Dados de Apoio Logístico (BDAL) e Atributos Logísticos**

Para sistemas de defesa de alta complexidade, com aproximadamente 1.000.000 de itens, as informações logísticas associadas (produtos logísticos), mostradas, por exemplo, no Apêndice B, se apresentam em grande quantidade conforme o processo de AAL vai evoluindo. Essa grande quantidade de informações logísticas é armazenada em um banco de dados, chamado de Banco de Dados de Apoio Logístico (BDAL).

O BDAL reúne todas as informações logísticas geradas pelo processo de AAL ao longo das fases de concepção, desenvolvimento e produção, e tem por objetivo fundamental prover os dados necessários para a implantação do sistema de apoio logístico do sistema de interesse.

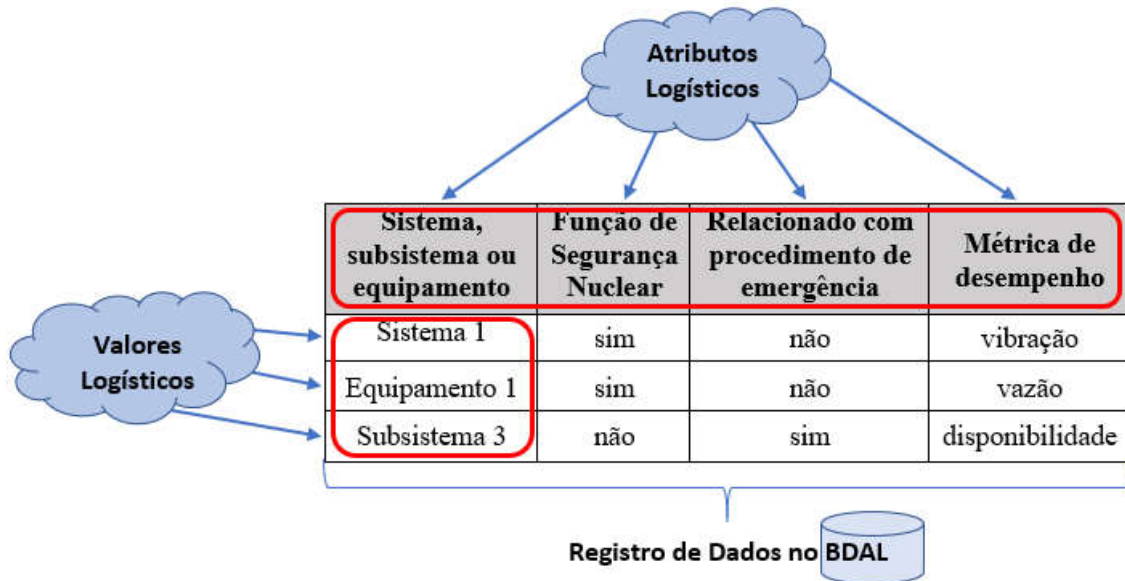
Essa transferência de informações é um ponto crítico entre o desenvolvimento do sistema e sua implantação, e pode determinar o sucesso, ou o fracasso, da implantação do sistema de apoio. O fracasso nesses casos pode ser caracterizado por: inconsistência de dados, dados registrados de forma incorreta, falta de compatibilidade entre os dados gerados e os sistemas recebedores, formato de dados fornecidos pelos fabricantes não compatíveis com as regras de registro de dados do BDAL, etc.

Com o objetivo de maximizar a eficiência do registro de dados no BDAL, é realizada, logo no início da AAL, a definição do formato e tipo de dados, caracterizando as regras de negócio do BDAL. Esses dados do BDAL são denominados de atributos logísticos, e estão relacionados com os elementos logísticos mostrados na Figura 35. Cada um desses atributos pode assumir um conjunto de valores logísticos pré-definidos.

Esses atributos logísticos podem ser processados no BDAL gerando informação logística útil (produtos logísticos), tais como, manuais técnicos, lista de manutenções, lista de estruturas relacionadas com função de segurança nuclear, índice de funções críticas de segurança, etc.

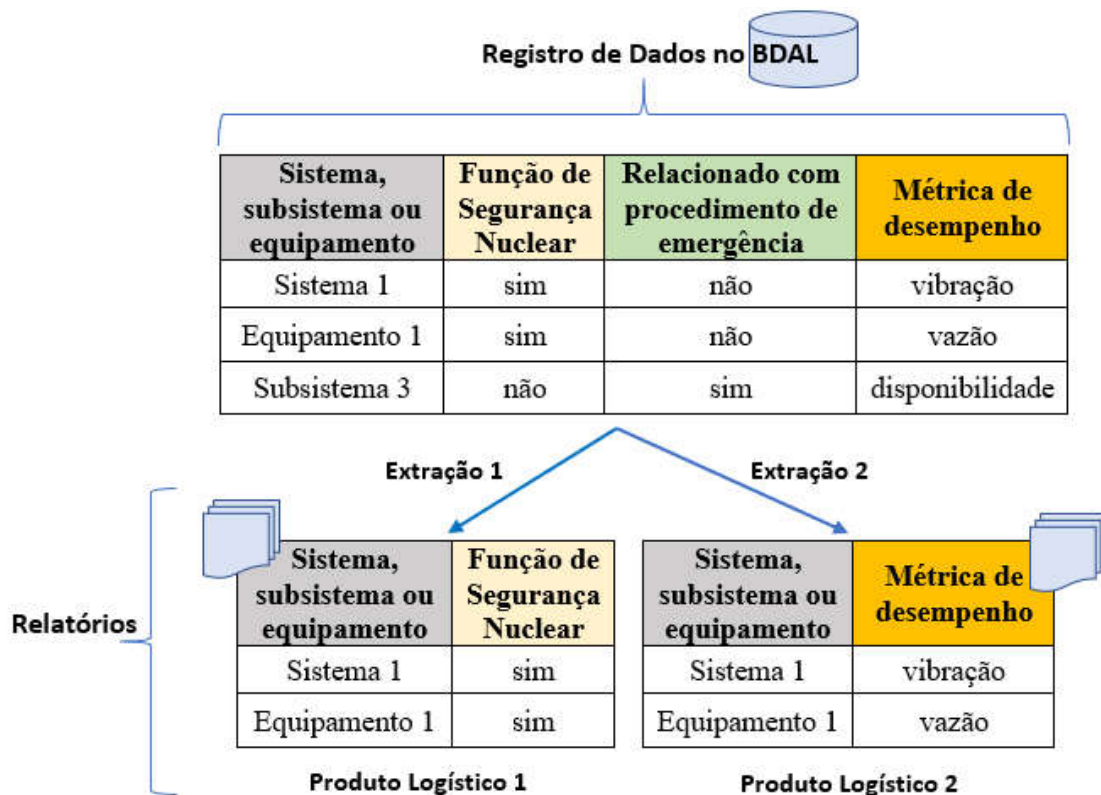


A Figura 36 apresenta, como exemplo, como alguns atributos logísticos e seus respectivos valores logísticos podem ser registrados dentro de um BDAL. Da figura observa-se que o “sistema 1” desempenha uma função de segurança nuclear, e não é utilizado em procedimento operacional de emergência, possuindo como métrica de desempenho valores de vibração.



**Figura 36:** Ilustração de uma possível organização de atributos logísticos e respectivos valores logísticos dentro de um BDAL

Uma vez definidos os atributos logísticos de interesse dentro do BDAL, e registrados os respectivos valores logísticos como resultado do processo de AAL, é possível extrair informações úteis conforme a necessidade. Por exemplo, do registro de dados apresentado pela Figura 36 é possível extrair: (1) os sistemas/equipamentos que desempenham função de segurança nuclear; (2) as métricas de desempenho dos sistemas/equipamentos que desempenham função de segurança nuclear. A Figura 37 ilustra a extração dessas duas informações diretamente do BDAL.



**Figura 37:** Ilustração da extração de dados do BDAL em forma de relatório para fins específicos

#### 4.7 Produtos Logísticos relacionados com o MEM

Como já dito aqui, os elementos logísticos reúnem todas as informações necessárias para realizar a operação, a manutenção e apoio logístico do sistema de interesse (nesse contexto, o submarino). Considerando que o monitoramento da eficácia da manutenção é uma atividade que contribui para a continuidade da operação do submarino conforme projetado, é razoável pensar que exista um conjunto de produtos logísticos relacionados com a realização das atividades de monitoramento da eficácia da manutenção.

Uma vez identificados estes produtos logísticos relacionados com o MEM, são definidos os elementos logísticos que ficarão encarregados de obter essas informações durante as fases de *design*<sup>35</sup>. Por exemplo, considerando que as funções de cada um dos ESC que compõe a arquitetura do submarino é uma informação necessária para realizar o MEM, pode ser incluído no escopo do elemento logístico Interface de Projeto atividades

<sup>35</sup> Deve ser entendido que fases de *design* são as fases de concepção, desenvolvimento e produção.

para obter essa informação durante as fases de *design*. A Tabela 21: ilustra exemplos de produtos logísticos relacionados com a realização do MEM, o elemento logístico associado, e as atividades que podem ser realizadas pelo projetista de ALI<sup>36</sup> para obter o produto logístico desejado.

**Tabela 21:** Exemplos de produtos logísticos relacionados ao MEM

<b>Produto Logístico</b>	<b>Elemento Logístico associado</b>	<b>Atividade do projetista de ALI para obter o produto logístico</b>
Funções de todos os ESC do Submarino	Interface de <i>design</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabalhar junto ao projetista do sistema a fim de garantir que cada ESC da arquitetura do submarino tenha sua função definida de forma clara e precisa.</li> <li>- Garantir que seja definido quando o ESC deixa de realizar sua função projetada (não-função).</li> </ul>
ESC que desempenham função de segurança nuclear	Interface de <i>design</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabalhar junto ao projetista e com especialistas de segurança nuclear a fim de identificar os ESC que desempenham função de seg. nuclear.</li> </ul>
Tarefas de manutenção de itens que desempenham função de segurança nuclear	Gestão e planejamento da manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar a partir dos modos de falha de ESC que desempenham função de segurança nuclear as tarefas de manutenção que contribuem para a preservação das capacidades operacionais.</li> </ul>
Competência <sup>37</sup> do pessoal envolvido na execução do MEM para o submarino	Pessoal e carga de trabalho.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar as competências (conhecimento, habilidade e atitude) do pessoal envolvido nas atividades e tarefas do MEM.</li> </ul>
Recursos computacionais necessários para executar atividades de MEM	Recursos Computacionais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar os recursos computacionais (hardware e software) necessários para a consecução das atividades de MEM.</li> </ul>

<sup>36</sup> Profissional pertencente à equipe de projeto que desempenha atividades relacionadas ao processo de ALI.

<sup>37</sup> A competência de um profissional em uma certa área de conhecimento é definida pelo conhecimento (formação acadêmica/profissional, cursos, etc.), habilidade (experiência prática de aplicação do conhecimento, o saber fazer) e atitude (forma como profissional aplica o conhecimento/habilidade: precisa, sistemática, metódica, analítica, intuitiva, normativa, etc.).

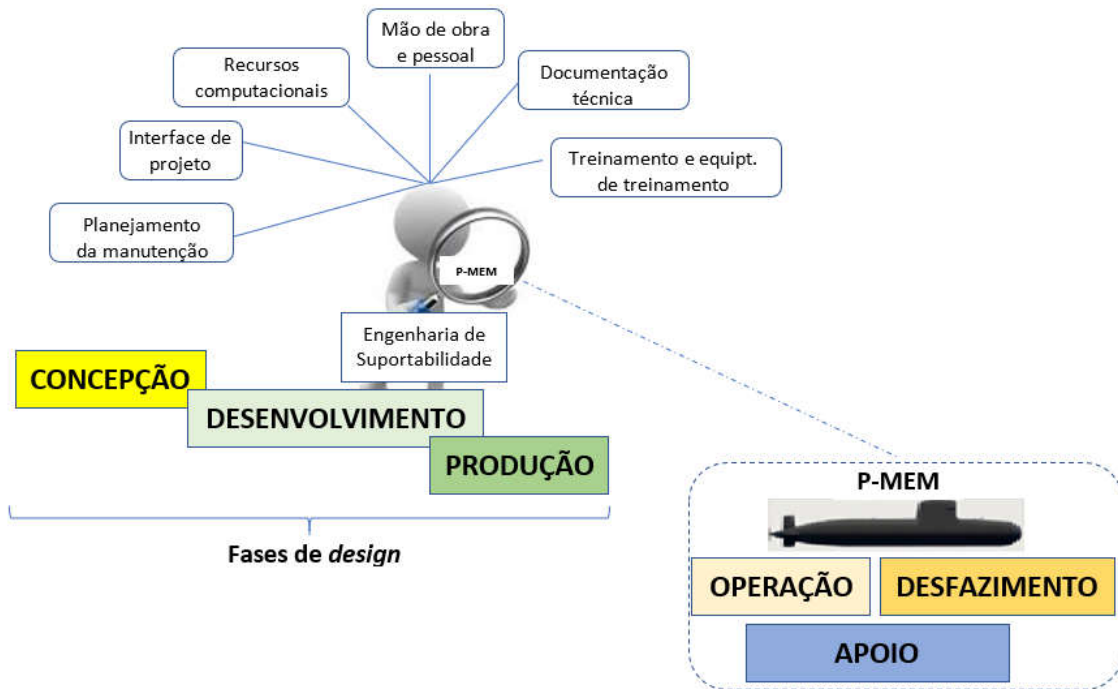
Um excelente ponto de partida para determinar todos os recursos logísticos necessários para o MEM é definir o processo que o realiza, o Processo de MEM (P-MEM). O P-MEM pode ser considerado um produto logístico decorrente do elemento logístico Engenharia de Suportabilidade<sup>38</sup>. A Tabela 22 apresenta um exemplo de definição do P-MEM para o submarino:

**Tabela 22:** Exemplo de definição para o processo que realiza o MEM

Nome:	Processo de Monitoramento da Eficácia da Manutenção (P-MEM)
Propósito:	Avaliar se o desempenho operacional de itens importantes à segurança está dentro dos limites estabelecidos em projeto.
Atividades:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definir os ESC dentro do escopo do P-MEM;</li> <li>2. Definir os ESC no escopo do P-MEM significativos para o risco.</li> <li>3. Estabelecer metas de desempenho para os ESC no escopo do P-MEM;</li> <li>4. Monitorar o desempenho dos ESC no escopo do P-MEM;</li> <li>5. Identificar os ESC com desempenho fora das metas estabelecidas e tomar ações corretivas;</li> <li>6. Avaliar e gerenciar o impacto no risco decorrente da realização de atividades de manutenção;</li> <li>7. Elaborar, registrar e divulgar relatórios periódicos do desempenho dos ESC no escopo do P-MEM.</li> </ol>
Entrada:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Todos os ESC da arquitetura do submarino, com suas funções e métricas de desempenho associadas.</li> <li>2. Plano de Apoio Logístico do Submarino</li> </ol>
Saídas:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ESC incluídos no escopo do P-MEM.</li> <li>2. Relatório de desempenho de ESC no escopo do P-MEM</li> <li>3. Plano de gerenciamento de atividades de manutenção com impacto no risco de segurança nuclear.</li> </ol>
Métodos/ procedimentos:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Análise de dados de falha.</li> <li>2. Análise de causa raiz; reuniões de avaliação com especialistas de diferentes áreas (operação, segurança, manutenção, apoio logístico, etc.).</li> <li>3. Análise probabilística e determinística de segurança.</li> </ol>
Referência:	NUMARC 93-01 REV 4E: Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants. 2015

Tomando como base o P-MEM que será realizado durante as fases de operação, apoio e desfazimento é possível aplicar o processo de ALI durante as fases de *design* e definir outros produtos logísticos necessários para a sua realização. Tal fato está ilustrado na Figura 38.

<sup>38</sup> A engenharia de suportabilidade pode ser entendida como o conjunto de métodos, procedimentos e processos utilizados para manter de forma continuada a suportabilidade projetada de um sistema e seu sistema de apoio.



**Figura 38:** Ilustração da definição de produtos logísticos relacionados ao MEM do submarino nuclear durante as fases de *design*

O processo de ALI possui várias referências acadêmicas e normativas para sua aplicação. Dentre as quais, pode-se citar as seguintes:

- a) Referências acadêmicas:
  - a. Logistics Engineering and Management [32];
  - b. Integrated Logistics Support Handbook [45].
- b) Referências normativas:
  - a. MIL-HDBK-502: Department of Defense Handbook – Acquisition Logistics [35];
  - b. ASD STAN S3000L - Logistic Support Analysis [46].

Cabe ao gerente do projeto adotar uma delas ou adaptá-las conforme a natureza do sistema em desenvolvimento ou o contexto da organização onde o projeto é executado.

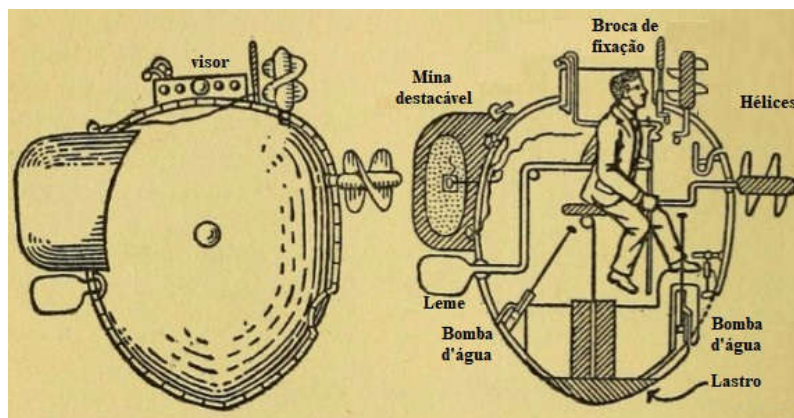
## Capítulo 5 - Submarino de Propulsão Nuclear

Este capítulo tem por objetivo apresentar e discutir as principais características de um submarino de propulsão nuclear que podem influenciar as atividades relacionadas ao monitoramento da eficácia da manutenção de itens importantes à segurança nuclear. Para tanto, será utilizado como referência o trabalho de Guimarães [52], por ser considerado uma fonte rica de informações, e de fácil acesso, sobre as características de um submarino de propulsão nuclear.

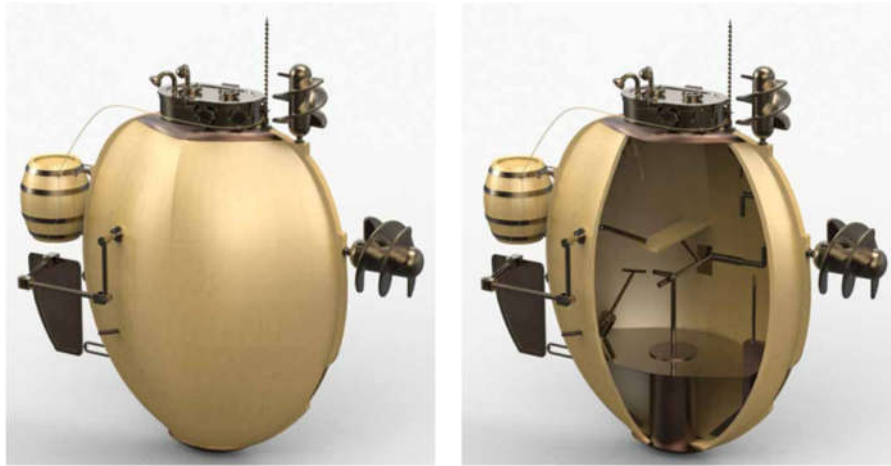
### 5.1 Plataforma Submarino Convencional

Os submarinos são plataformas de navegação peculiares, pois se propõem a fazê-la de maneira submersa. A navegação submersa surgiu por meio da necessidade de ocultação, ou elemento surpresa, por ocasião das guerras travadas no passado.

O primeiro submarino com aplicação em guerra foi o modelo do norte-americano David Bushnell, o Turtle, utilizado em 1776 na guerra de independência norte-americana. O modelo de Bushnell utilizou soluções de engenharia disponíveis na época e apresentava grandes desafios para a navegação com muitas tarefas a serem desempenhadas por apenas um tripulante, tais como: utilização de bombas manuais para retirada de água do interior do submarino, sistema de propulsão manual para deslocamento vertical e horizontal do modelo, peso de lastro na parte inferior do modelo para aumento da estabilidade com o deslocamento do centro de inércia, pequena janela para observação do exterior, leme manual para direcionar seu deslocamento, e mina destacável para fixação em outras embarcações (Figura 39 e Figura 40).

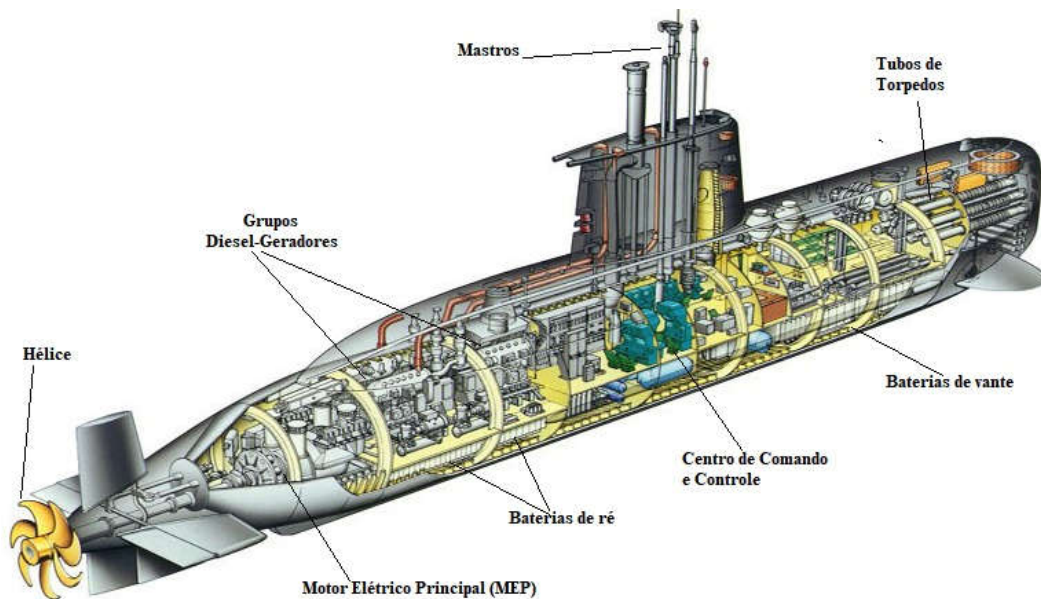


**Figura 39:** Representação do submarino de Bushnell (Turtle)  
**Fonte:** Adaptado de MILKOFISKY [47].



**Figura 40:** Concepção artística do submarino de David Bushnell.  
**Fonte:** BRASIL [48].

O advento do Turtle e o aperfeiçoamento das técnicas de engenharia permitiram o surgimento de novas tecnologias que tornaram os submarinos dos dias atuais plataformas de guerra extremamente poderosas, como é o caso do submarino de propulsão nuclear. A Figura 41 ilustra uma concepção artística do submarino convencional Tikuna<sup>39</sup>. A Tabela 23 reúne as principais características de um submarino convencional.



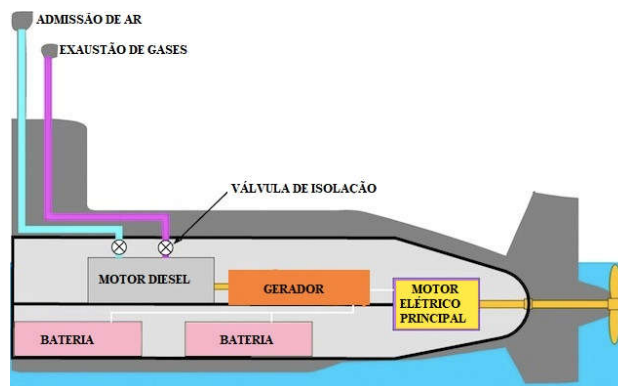
**Figura 41:** Concepção artística do submarino convencional (S-34) Tikuna.  
**Fonte:** Adaptado de WILTGEN [49].

<sup>39</sup> O Tikuna (S-34), da classe Tupi, é um submarino brasileiro de propulsão diesel-elétrica.

**Tabela 23:** Principais características de um submarino convencional de propulsão diesel-elétrica.  
**Fonte:** Adaptado de PODER NAVAL [50].

SUBMARINO COM PROPULSÃO CONVENCIONAL	
Deslocamento	1200-1800 t (submerso)
Comprimento	60-80 m
Diâmetro	6-8 m
Fonte de energia	Baterias carregadas por geradores diesel
Autonomia	40-60 dias de autonomia
Profundidade máxima	200-300 m
Velocidade	10-15 nós (superfície) 20-23 nós (submerso)
Propulsão	Motor Elétrico Principal Gerador-Diesel
Tripulação	30-40 (oficiais e praças)

O sistema de propulsão do submarino convencional possui um motor elétrico principal (MEP) que transmite torque para o eixo do hélice deslocando o submarino. Sua principal fonte de energia advém de grupos diesel-geradores. Esses grupos geradores são utilizados com o submarino próximo à superfície, pois demandam a admissão de ar para promover a combustão interna no motor diesel. Os geradores diesel são utilizados para carregar as baterias principais, as quais fornecem energia para o MEP e os demais sistemas de bordo enquanto o submarino se encontra submerso. Por utilizar um gerador diesel e um motor elétrico para a sua propulsão, diz-se que este tipo de submarino tem propulsão diesel-elétrica. A Figura 42 ilustra o sistema de propulsão diesel-elétrica de um submarino convencional.



**Figura 42:** Ilustração do sistema de propulsão diesel-elétrica de um submarino convencional  
**Fonte:** Adaptado de N.R.P. [51]



## 5.2 Plataforma Submarino Nuclear

O submarino com propulsão nuclear, diferente do submarino com propulsão convencional, utiliza como fonte principal de energia um reator nuclear tanto para o seu sistema de propulsão quanto para o consumo elétrico dos outros sistemas de bordo.

De acordo com Guimarães [52], existem registros de estudos e da utilização na prática de vários tipos de reatores nucleares para propulsão naval<sup>40</sup>, entretanto, destaca que o Reator a Água Pressurizada (PWR) é amplamente utilizado para este fim, chegando a equipar mais de 330 submarinos nucleares balísticos, entre outros navios, tais como, porta-aviões, cruzadores, mercantes e quebra-gelo. O reator PWR é o escolhido pela Marinha do Brasil [53] para equipar o primeiro submarino nuclear Brasileiro (SN-BR).

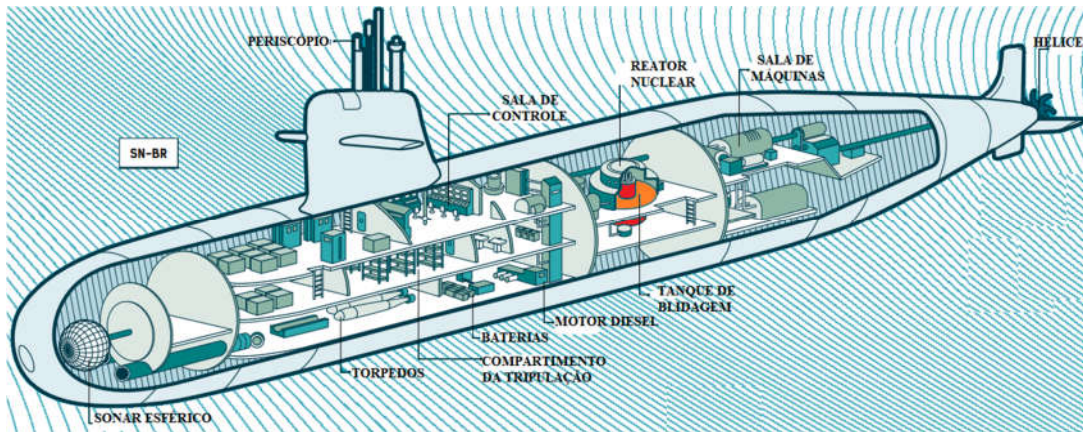
Segundo Brasil [53], o SN-BR terá aproximadamente 100 m de comprimento e 10 m de diâmetro, e contará com um reator PWR de 48 MW térmicos, podendo atingir velocidade de navegação submersa de até 20 nós. Em termos de peso, o SN-BR contará com aproximadamente 6000 t, podendo chegar até 350 m de profundidade. A Figura 43 apresenta uma concepção artística do SN-BR. A Tabela 24 reúne suas principais características.

**Tabela 24:** Principais características do submarino nuclear brasileiro (SN-BR)

**Fonte:** Adaptado de BRASIL [53].

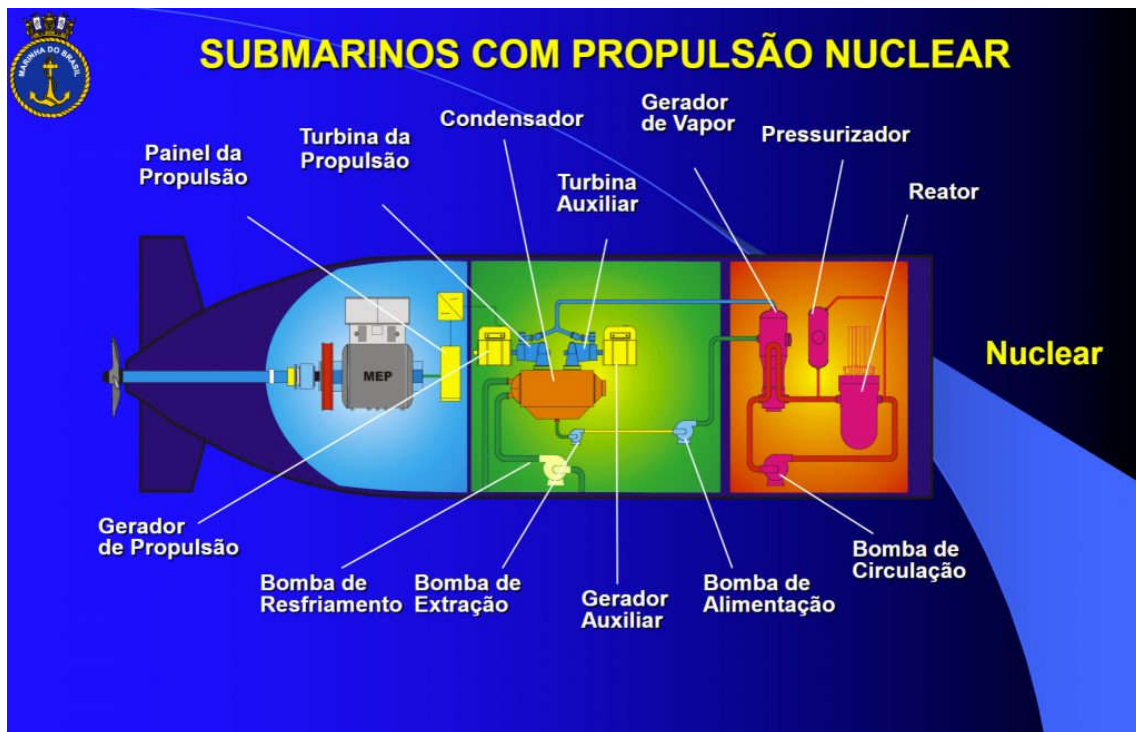
SUBMARINO BRASILEIRO COM PROPULSÃO NUCLEAR (SN-BR)	
Deslocamento	6000 - 6500 t (submerso)
Comprimento	90 - 110 m
Diâmetro	9 - 10 m
Altura Máxima	15 - 17 m
Velocidade	20 - 25 nós (aprox. 45km/h)
Profundidade	Até 350 m
Autonomia	Ilimitada
Fonte de energia	Reator Nuclear (principal) Diesel-gerador (emergência) Baterias (emergência)
Propulsão	Núcleo-elétrica (reator nuclear e motor elétrico)
Tripulação	90 - 100 (oficiais e praças)

<sup>40</sup> Reator de Água Pressurizada (PWR), bem como os PWR acoplados (CCPWR) e os PWR integrados (IPWR).



**Figura 43:** Conceção artística do primeiro submarino brasileiro com propulsão nuclear (SN-BR)  
**Fonte:** Adaptado de BRASIL [53]

No sistema de propulsão do SN-BR, o lado secundário da planta nuclear possui duas turbinas de vapor: a turbina de propulsão, e a turbina auxiliar. A turbina de propulsão fornecerá energia elétrica para o MEP por meio de um gerador elétrico, o gerador de propulsão. A turbina auxiliar fornecerá energia elétrica para as baterias (emergência) e os demais sistemas de bordo. A Figura 44 apresenta uma concepção artística para o sistema de propulsão do SN-BR.



**Figura 44:** Ilustração do sistema de propulsão nuclear do SN-BR.  
**Fonte:** PODER NAVAL [54].

Para Guimarães [52], o submarino com propulsão nuclear pode ser entendido como a soma de duas plataformas: o navio, e a Instalação Propulsora Nuclear (IPN). A plataforma-navio contém os sistemas de um navio, e a IPN contém os sistemas de uma planta de geração de energia nuclear (vide Tabela 25).

**Tabela 25:** Principais sistemas de um submarino com propulsão nuclear  
**Fonte:** Adaptado de GUIMARÃES [52]

<b>Submarino com Propulsão Nuclear</b>	
<b>Plataforma-navio</b>	<b>Instalação Propulsora Nuclear (IPN)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instalação de máquinas;</li> <li>▪ Sistemas de governo e manobra;</li> <li>▪ Sistema de navegação;</li> <li>▪ Sistemas de Comunicação;</li> <li>▪ Acomodações;</li> <li>▪ Sistema de Combate;</li> <li>▪ Estrutura do casco;</li> <li>▪ Sistema de elétrico;</li> <li>▪ Sistema de resfriamento;</li> <li>▪ Sistema de propulsão;</li> <li>▪ Sistema hidráulico;</li> <li>▪ Sistema pneumático;</li> <li>▪ Sistema de ventilação, aquecimento e condicionamento de ar;</li> <li>▪ Sistema de acionamento do eixo propulsor.</li> <li>▪ Sistema de controle da plataforma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reator e circuito primário;</li> <li>▪ Sistemas auxiliares associados ao circuito primário;</li> <li>▪ Dispositivos especiais de segurança;</li> <li>▪ Dispositivos especiais de blindagem;</li> <li>▪ Circuito secundário;</li> <li>▪ Sistema de resfriamento dos condensadores principais do circuito secundário.</li> </ul>

O planejamento das atividades de MEM de itens importantes à segurança pertencentes à IPN deve levar em consideração as seguintes características inerentes a plataforma-navio:

- a) Perfil de utilização;
- b) Configuração de Operação: no mar, no cais e dique seco;
- c) Limitação de espaço dentro do submarino.

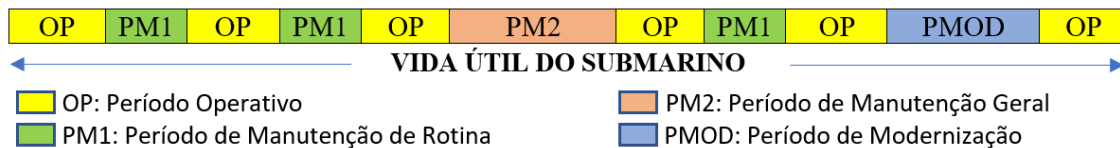
### **5.3 Perfil de utilização de um submarino nuclear**

O perfil de utilização de um submarino nuclear é fortemente caracterizado pelo cenário operativo da Força Armada que o detém, mas em geral, compreende: (1) períodos de atividades operativas (patrulhas, treinamentos, efetivo combate, etc.); (2) períodos de manutenção (programadas e não programadas); e (3) períodos de modernização.

Os períodos de atividades operativas possuem duração que dependem da natureza da missão, compreendendo períodos de efetiva navegação, e outros períodos de permanência em porto (prontidão operativa). Guimarães [52] destaca que os submarinos nucleares de ataque (SNA) <sup>41</sup> possuem em média períodos de atividades operativas com duração de 60 dias.

A duração dos períodos de manutenção é determinada, em geral, pela complexidade da atividade de manutenção e pelo apoio logístico envolvido. Os períodos de manutenção de menor complexidade são realizados com o submarino atracado no cais, e duram em média 4 semanas. Os períodos de manutenção de média e grande complexidade são realizados com o submarino em dique seco (vide Figura 32), e duram em média 3 meses e 12 meses, respectivamente.

Os períodos de modernização são períodos destinados à substituição programada de alguns sistemas obsoletos ou a modificações de projeto, geralmente devido ao surgimento de sistemas mais eficientes. Em geral, é planejado um período de modernização ao longo da vida útil de um submarino nuclear. Para Guimarães [52], os SNA possuem uma vida útil de aproximadamente 30 anos. A Figura 45 apresenta um exemplo de perfil de utilização composto por seis períodos operativos (OP), três períodos de manutenção de rotina (PM1) de menor complexidade, um período de manutenção geral (PM2) e um período de modernização.



**Figura 45:** Exemplo de um perfil de utilização de um submarino nuclear ao longo de sua vida útil

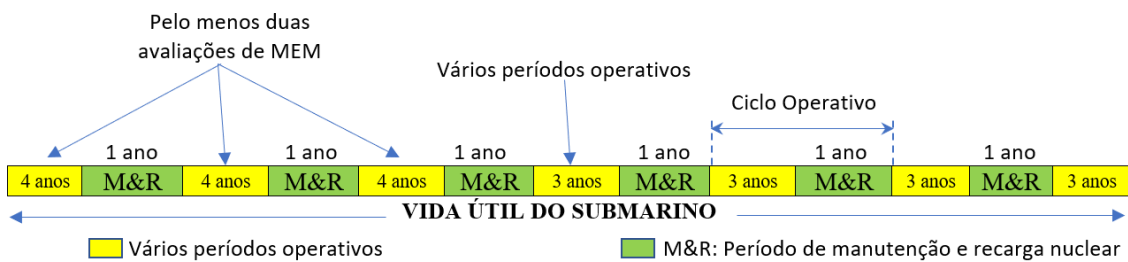
O perfil de utilização final é uma solução proposta pelos projetistas de apoio logístico integrado que levam em consideração a duração de cada um dos períodos operativos e a disponibilidade global do submarino, impostas pelo cliente (dono do projeto). A duração e quantidade dos períodos de manutenção, e de modernização, são definidos levando em

<sup>41</sup> Submarino de propulsão nuclear que utiliza sua alta capacidade de locomoção (entre 20 e 25 nós) e de permanência no mar (entre 60 e 100 dias, limitada apenas à quantidade de mantimentos a bordo e sanidade mental da tripulação) podendo lançar minas, torpedos ou mísseis contra outros navios em missões de negação do uso do mar. O SN-BR é um tipo de submarino nuclear de ataque (SNA).

consideração a confiabilidade da tecnologia disponível (equipamentos e sistemas) e da necessidade de recarga do combustível nuclear, em geral, realizados em períodos de manutenção de média e longa duração.

De acordo com Brasil [53], as recargas de combustível nuclear para o SN-BR deverão ser realizadas aproximadamente a cada 5 anos, muito provavelmente definidas pelo grau de enriquecimento do urânio utilizado e pela tecnologia empregada na engenharia do reator.

Considerando a vida útil de 30 anos e recargas de combustível a cada 5 anos, tem-se, pelo menos, 6 paradas do submarino, que também podem ser oportunamente utilizadas para a realização de atividades de manutenção de média e longa duração. A Figura 46 ilustra um perfil de utilização para o submarino nuclear considerando períodos de mesma duração tanto para recarga quanto para manutenção.



**Figura 46:** Perfil de utilização para o SN-BR com troca de combustível a cada 5 anos (máximo)

Cabe ressaltar que a periodicidade máxima de recarga proposta para o SN-BR (5 anos) e o item (a)(3) da RM (vide Tabela 1) impõe que as atividades de avaliação de MEM e de manutenção preventiva sejam realizadas no mínimo duas vezes nos ciclos operativos iniciais<sup>42</sup> (vide Figura 46).

<sup>42</sup> Um ciclo operativo é composto por vários períodos operativos e um período de manutenção de médio ou grande porte.

## 5.4 Locais de operação de um submarino nuclear: mar, cais ou dique

Como qualquer navio de guerra, os locais de operação de um submarino nuclear incluem: o mar, o cais e o dique. Para cada um desses locais são definidos os estados dos sistemas/subsistemas internos do submarino, e também do seu sistema de apoio, caracterizando as configurações operacionais.

Cada uma das possíveis configurações operacionais deve atender à autonomia desejada para o submarino em cada local de operação. Por exemplo, durante o patrulhamento de uma área marítima (operação no mar) deseja-se que o submarino entregue sua capacidade projetada de modo totalmente autônomo, ou seja, que os seus sistemas e subsistemas sejam capazes de realizar plenamente suas funções sem qualquer auxílio externo.

Durante a permanência no cais ou no dique, a autonomia do submarino pode ser reduzida por ocasião da realização de atividades de manutenção ou para preservação de algum sistema interno, demandando, por vezes, o uso de recursos externos (sistema de apoio) para o seu funcionamento, por exemplo: energia elétrica, água para o resfriamento de componentes, comunicação de internet/telefone, alimentação e acomodação para a tripulação, etc. Durante os reparos de grande porte, e trocas de combustível nuclear, o submarino pode ficar totalmente indisponível e sem autonomia, dependendo exclusivamente dos recursos do seu sistema de apoio. A Tabela 26 apresenta exemplos de configurações operacionais possíveis para um submarino nuclear.

**Tabela 26:** Exemplos de configuração operacional para um submarino nuclear

<b>Condicionantes</b> <b>Estado desejado</b>	<b>Disponibilidade sistemas de bordo</b>	<b>Suporte externo (sistema de apoio)</b>	<b>Manutenção (sistema de bordo)</b>	<b>Autonomia do submarino</b>	<b>Condição do Reator</b>
<b>Operação no mar</b>	Total	Nenhum	Reparos de pequeno porte (inspeção visual, ajustes, etc.)	Total	Operando a quente (100% potência nominal)
<b>Prontidão no cais</b>	Parcial ou total	Nenhum ou Médio porte (eletricidade, gases, etc.)	Reparos de médio porte que não impactam no estado de prontidão.	Total ou Parcial	Operando a quente ou Desligado a quente (~50% potência nominal)
<b>Manutenção cais ou dique</b>	Parcial ou indisponíveis	Médio e grande porte (cais, dique, oficinas, guindastes, etc.)	Reparos de médio e grande porte.	Parcial ou sem autonomia	Desligado a quente ou desligado a frio (~15% potência nominal).

A presença da IPN dentro de um submarino exige da plataforma-navio (outros sistemas do submarino, exceto a IPN) algumas necessidades para o seu funcionamento. Por exemplo, os sistemas da plataforma-navio devem fornecer água de resfriamento para os sistemas auxiliares do circuito primário e secundário da IPN. Guimarães [52] afirma que além das necessidades impostas para o seu funcionamento, a IPN impõe também para a plataforma-navio outras restrições que são decorrentes do seu próprio funcionamento ou intrínsecas a sua própria natureza, que ele classifica como carregamentos. Por exemplo, os sistemas e equipamentos da IPN impactam o arranjo<sup>43</sup> geral e aumentam de forma considerável o peso total do submarino. A Tabela 27 apresenta alguns carregamentos e necessidades impostos pela IPN a plataforma-navio.

**Tabela 27:** Carregamentos e necessidades intrínsecos a presença e ao funcionamento de uma IPN dentro de um submarino nuclear. **Fonte:** GUIMARÃES [52]

IPN	Plataforma-navio
Carregamentos	Necessidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peso e arranjo;</li> <li>- Radiação ionizante;</li> <li>- Liberação de material radioativo (normal e acidental);</li> <li>- Vibração e ruído (discrção acústica);</li> <li>- Elevação de temperatura (assinatura térmica);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fornecimento contínuo de energia, fluidos diversos, ventilação e água de resfriamento;</li> <li>- Blindagem radiológica;</li> <li>- Pessoal especializado para operação;</li> <li>- Serviço de radioproteção;</li> <li>- Sobressalentes e ferramentas especiais;</li> <li>- Oficinas;</li> <li>- Laboratório de análises químicas.</li> </ul>

De modo análogo, Guimarães [52] destaca que há também imposições e carregamentos/necessidades entre a IPN e o sistema de apoio do submarino nuclear, conforme apresentado na Tabela 28.

Cabe observar que, de forma peculiar, um submarino nuclear pode ser considerado ora como uma usina nuclear móvel totalmente autônoma (por exemplo, quando operando no mar ou em prontidão no cais), e em outro momento pode ser considerado, juntamente com seu sistema de apoio, uma usina nuclear fixa (por exemplo, quando docado em dique).

<sup>43</sup> Refere-se ao modo, configuração ou disposição em que os sistemas e equipamentos estão organizados dentro de um submarino. Devido ao peso considerável do circuito primário de uma IPN, o reator nuclear geralmente está localizado longitudinalmente no meio do submarino. (nota do autor)

Na configuração operacional do submarino docado, ele e seu sistema de apoio têm que atender toda a legislação imposta pelo órgão regulador nuclear brasileiro para usinas fixas, a CNEN.

**Tabela 28:** Carregamentos e necessidades impostos ao sistema de apoio de um submarino nuclear decorrentes da presença de uma IPN no seu interior. **Fonte:** GUIMARÃES [52]

IPN	Sistema de Apoio
Carregamentos	Necessidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acidentes nucleares na condição de reator desligado;</li> <li>- Liberação (ou transferência) de materiais radioativos (normal ou acidental);</li> <li>- Período entre recargas de combustível;</li> <li>- Armazenagem de combustível irradiado e de combustível novo.</li> <li>- Radiações;</li> <li>- Descomissionamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fornecimento contínuo de energia, fluidos diversos, ventilação e água de resfriamento no cais e em dique seco;</li> <li>- Instalações especializadas para troca de combustível, processamento de rejeitos e efluentes e descontaminação de componentes;</li> <li>- Pessoal especializado para manutenção;</li> <li>- Serviço de radioproteção;</li> <li>- Sobressalentes e ferramentas especiais e oficina “quente”;</li> </ul>

Por outro lado, quando na configuração operacional “prontidão no cais”, apresentada pela Tabela 26, o submarino é parcialmente autônomo, podendo inclusive realizar algumas manutenções e receber suporte de terra<sup>44</sup>, como energia e fluidos. Nesse caso, não é totalmente claro se o submarino deve ser considerado uma usina móvel ou fixa (juntamente com o sistema de apoio). Em tal situação seria até mesmo possível considerar uma terceira opção, uma usina móvel-fixa, por exemplo.

São questões como essas que serão pauta de discussão entre a CNEN e a recém ativada [55], 07 de fevereiro de 2018, Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (AgNSNQ). A AgNSNQ tem o propósito de atuar como órgão regulador e fiscalizador das atividades afetas à Segurança e ao Licenciamento Nucleares, na Marinha, de meios navais e instalações terrestres, bem como supervisionar as atividades da área de qualidade da MB [56].

<sup>44</sup> A expressão “suporte de terra” refere-se aos recursos de apoio logístico, fixos ou móveis, que são fornecidos do continente para o submarino. Por exemplo, subestação de energia fixa que fornece energia elétrica para o submarino atracado no cais.



A Tabela 29 apresenta a configuração operacional do submarino nuclear relacionada à discussão anterior.

Discussões como essa estão diretamente ligadas ao licenciamento do submarino nuclear e também influenciam as atividades de MEM, uma vez que o estado das condicionantes que compõe a configuração operacional do conjunto submarino e seu sistema de apoio definem o risco/grau de segurança nuclear associado ao conjunto.

Uma vez determinado o risco de segurança (probabilidade de ocorrência de um evento indesejado previsto na base de projeto) associada à configuração operacional do submarino, o item (a)(4) da Regra da Manutenção e o item 20.1 da CNEN 1.26 [4] determinam que sejam medidos e gerenciados o impacto nesse risco decorrente, por exemplo, de atividades de manutenção.

**Tabela 29:** Exemplo de configuração operacional do submarino nuclear funcionando como usina fixa, móvel e móvel-fixa

Condicionantes Estado desejado	Sistemas da plataforma-navio necessários ao funcionamento da IPN	Suporte externo (sistema de apoio)	Autonomia do submarino para atender a IPN	Tipo de usina	Órgão Regulador Nuclear
<b>Operação no mar</b>	Disponibilidade Total	Nenhum	Total	Móvel	AgNSNQ
<b>Prontidão no cais</b>	Disponibilidade Parcial ou total	Nenhum ou Médio porte	Total ou Parcial	Móvel, fixa ou móvel-fixa	AgNSNQ ou CNEN ou AgNSNQ / CNEN
<b>Manutenção cais ou dique</b>	Disponibilidade Parcial ou indisponíveis	Médio e grande porte	Parcial ou sem autonomia	Fixa	CNEN

Como já dito aqui, a definição das manutenções do submarino (tarefa, frequência e recursos de apoio logístico) é realizada pelo projetista de ALI. Tais definições devem levar em consideração não somente questões determinísticas de segurança, mas também estudos probabilísticos de segurança de nível 1, avaliando o impacto na frequência de dano ao núcleo decorrente das manutenções propostas, e apresentar medidas mitigadoras para o seu gerenciamento.

Melo *et al* [57] destacam que a análise probabilística de segurança foca na identificação de sequência de eventos que podem levar ao derretimento do reator, e em

estudos de confiabilidade relacionados aos sistemas de segurança, identificando potenciais pontos fracos no *design* do sistema. A realização da manutenção pode alterar momentaneamente a confiabilidade de sistemas de segurança originando um evento iniciador de acidente.

A consideração de questões probabilísticas de segurança para a definição da manutenção do submarino é tipicamente um processo de tomada de decisão com informação do risco durante o licenciamento (fases de design). Melo *et al* [57] apontam que o processo de tomada de decisão com informação do risco para o licenciamento de plantas fixas já é utilizando nos EUA.

O sistema de interesse (submarino e sistema de apoio) é extremamente complexo, pois possui muitos subsistemas e equipamentos. A fim de garantir que o planejamento da manutenção do sistema de interesse atenda plenamente aos requisitos de segurança, é necessário sempre verificar o atendimento das funções críticas de segurança<sup>45</sup> (FCS).

Melo (56) aponta as seguintes funções críticas de segurança:

- a) Reatividade do reator;
- b) Inventário de refrigerante do primário;
- c) Transferência de calor do primário;
- d) Fonte fria do lado do secundário;
- e) Alimentação do gerador de vapor;
- f) Integridade do circuito primário.

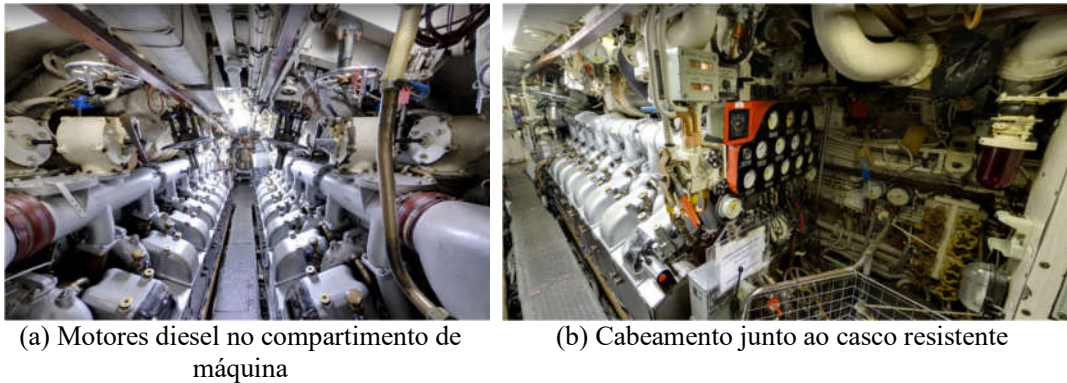
## 5.5 Limitação de espaço dentro do submarino

Diferente dos navios de superfície, os submarinos possuem alta restrição de espaço interno, chegando a ser um dos sistemas que mais otimiza o uso de espaço disponível. A parte (a) da Figura 47 mostra a disposição dos motores diesel na praça de máquina do

---

<sup>45</sup> As funções críticas de segurança compõem um conjunto de funções que representam de forma global todas as funções destinadas a manter o estado seguro de uma planta nuclear.

submarino convencional HMS Ocelot<sup>46</sup>. A parte (b) da mesma figura mostra equipamentos e cabeamentos dispostos junto ao casco do submarino na mesma praça de máquina.



**Figura 47:** Disposição dos equipamentos dentro de um submarino convencional, HMS Ocelot  
**Fonte:** GOOGLE [59]

Esta restrição de espaço exige o uso de equipamentos e sistemas cada vez mais compactos e confiáveis. A confiabilidade dos equipamentos e sistemas é fundamental neste caso, pois além de garantir de forma confiável a função para a qual foram projetados, demandam menos intervenções de manutenção. Contudo, mesmo os sistemas mais confiáveis uma hora, ou outra, irão demandar algum tipo de manutenção.

Devido à disposição compacta, geralmente é necessário retirar algumas interferências para o acesso a determinados equipamentos. Se algumas dessas interferências incluem sistemas e equipamentos relacionados com a segurança nuclear é necessário atenção redobrada no planejamento das intervenções de manutenção.

Na abordagem do processo de ALI, os acessos para manutenção, com definição de rotas de embarque e desembarque de ferramentas e sobressalentes, áreas mínimas para manutenção, provisão de facilidades para movimentação de equipamentos (por exemplo, olhais para manobra de peso) são de responsabilidade dos projetistas de ALI.

No planejamento da manutenção no interior do submarino, os equipamentos deverão ter sua disposição otimizada a fim garantir o menor impacto possível nos sistemas relacionados com a segurança nuclear.

---

<sup>46</sup> Submarino Convencional Inglês descomissionado em 1991. Atualmente o HMS Ocelot é um submarino museu.

Uma informação logística (produto logístico) que pode auxiliar sobremaneira a realização do MEM durante a operação do submarino é uma matriz que correlacione os ESC relacionados com a segurança que são afetados (desligados ou desempenho reduzida) devido à realização de manutenção em um equipamento qualquer. Um modelo dessa matriz é apresentado na Figura 48.

Tarefa de manutenção:	Identificação da tarefa de manutenção				Observação
Item	ESC de segurança impactados				
	ESC 1	ESC 2	ESC 3	ESC 4	
Sistema 1	X			X	Não realizar junto com subsistema 2
Subsistema 2		X	X		Não realizar junto com subsistema 3
Subsistema 3	X			X	Realizar junto com o sistema 1
Equipamento 3	X				-
Equipamento 4	X	X	X		- Reavaliar o arranjo - Realizar preferenc. no dique

Alto impacto

**Figura 48:** Matriz de impacto de manutenção em sistemas de segurança

Outra característica da IPN que influencia as atividades de MEM está relacionada com os equipamentos localizados dentro dos limites da contenção primária. A contenção primária no submarino nuclear é chamada de seção do reator. Conforme já dito aqui a seção do reator está localizada longitudinalmente a meio navio devido a restrições de peso e arranjo. A Figura 49 apresenta um modelo do SN-BR em escala reduzida com indicação da seção do reator.



**Figura 49:** Modelo em escala reduzida do SN-BR

**Fonte:** PODER NAVAL [60]

Devido à restrição de acesso de pessoal na seção do reator por questões de proteção radiológica, e considerando também o alto número de equipamentos no seu interior, a maioria dos equipamentos ali localizados possuem instrumentação embutida para

acompanhamento remoto de parâmetros de desempenho. Esses equipamentos e sua instrumentação, bem como os parâmetros a serem monitorados, são decorrentes de uma análise de criticidade dos possíveis modos de falha.

## **Capítulo 6 – Diretrizes para o Monitoramento da Eficácia da Manutenção para o submarino nuclear**

Este capítulo reúne as principais orientações e discussões relacionadas com a aplicação da Regra da Manutenção para o submarino nuclear brasileiro (SN-BR). Tais orientações são decorrentes da observação dos requisitos normativos da RM, da aplicação destes requisitos pela indústria, e das lições aprendidas da aplicação destes requisitos por alguns integrantes da indústria, dentre eles a usina nuclear de Angra 2.

### **6.1 Requisitos de alto nível para a realização do MEM**

O MEM compreende um conjunto de atividades que tem por objetivo garantir que os ESC relacionados com a segurança pertencentes ao submarino nuclear permaneçam executando suas funções de projeto por meio de ações eficientes de manutenção.

A execução do MEM é uma atividade intrínseca das fases de operação e apoio do CV do SN-BR. Essa execução demanda um planejamento extremamente detalhado, o qual evolui de forma gradativa conforme as estruturas, sistemas, subsistemas e componentes são detalhados ao longo das fases de concepção, desenvolvimento e produção.

É na fase de produção que o planejamento proposto para o MEM tem a sua avaliação final, sendo identificados possíveis pontos de melhoria, e dado o início da sua implantação<sup>47</sup> no local em que será executado.

Como qualquer atividade relacionada ao sistema de interesse, o MEM deve estar formalmente previsto no conceito operacional (OpsCon) do submarino nuclear, possibilitando haver desdobramentos de requisitos para a realização das suas atividades nas diversas fases do ciclo de vida do sistema.

Esse registro formal do MEM dentro do OpsCon serve também como instrumento de comunicação entre as diversas equipes que desenvolvem o submarino, respaldando a realização de atividades e o fornecimento de dados que contribuem para a consecução do planejamento do MEM.

---

<sup>47</sup> A implantação compreende: a transferência de dados, instalação de hardware e software de apoio, alocação de salas, mobiliário, movimentação de pessoal, etc.

O registro do MEM deve indicar de forma macro como as atividades serão desenvolvidas para cada fase do CV, e, sobretudo, deverá apontar os requisitos de referência de mais alto nível para a realização do MEM.

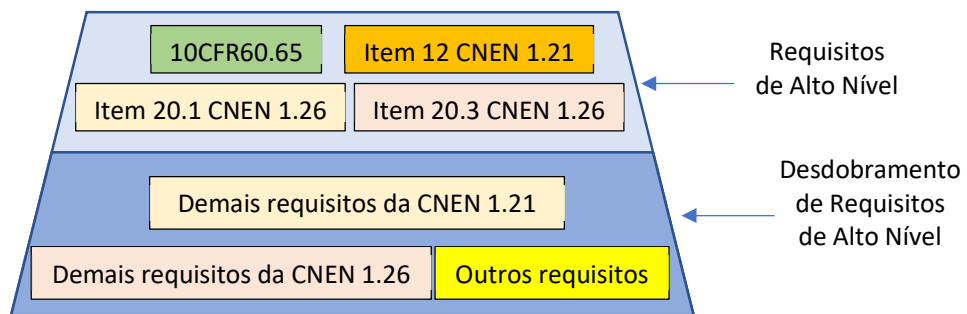
Sugere-se que este conjunto de referência contenha no mínimo os seguintes requisitos:

- a) Requisitos da Regra da Manutenção da 10CFR50.65 [8];
- b) Item 12 da CNEN 1.21 [3]; e
- c) Itens 20.1 e 20.3 da CNEN 1.26 [4].

De modo a haver uma organização da origem dos requisitos contidos nesse conjunto de referência, sugere-se que estes requisitos sejam classificados por grupos. Os requisitos apresentados acima fariam parte do grupo de requisitos normativos, com origem externa à instituição dona do projeto (cliente), nesse caso a Marinha do Brasil.

Os requisitos relacionados ao MEM impostos pela Marinha do Brasil fariam parte do grupo de requisitos do cliente. São exemplos de requisitos deste grupo, as diretrizes, os procedimentos e normas da própria MB relacionadas com a avaliação de desempenho de equipamentos de segurança.

Naturalmente, os demais requisitos da CNEN 1.21 [3] e CNEN 1.26 [4] deverão ser considerados no desenvolvimento do planejamento das atividades de MEM, compondo, por exemplo, um conjunto de requisitos detalhados, originados a partir do desdobramento daquele conjunto referência proposto. A Figura 50 ilustra a proposta acima.



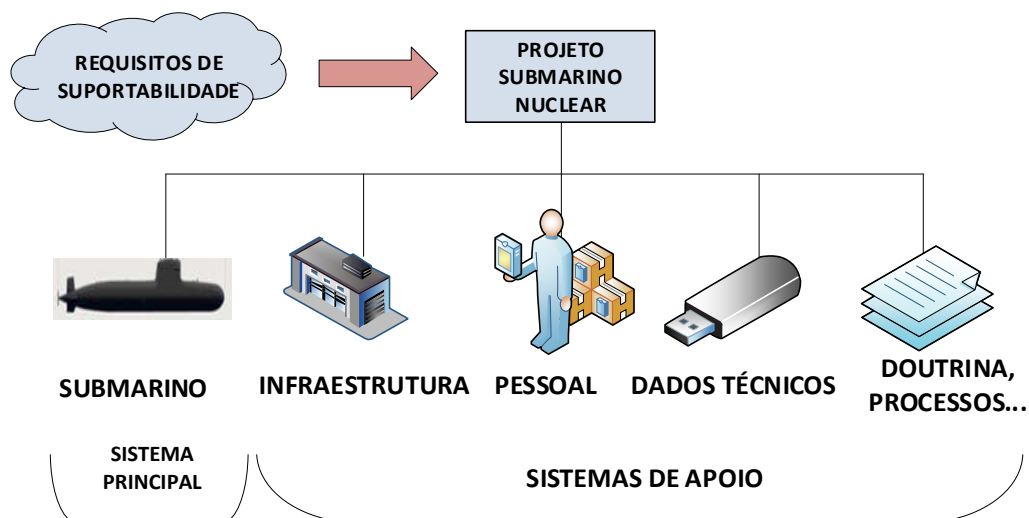
**Figura 50:** Requisitos de Alto Nível relacionados ao MEM

Para a elaboração do OpsCon, sugere-se que seja considerada a discussão apresentada no Capítulo 3 deste trabalho e utilizada como referência a norma ISO/IEC 29148 [27].

Conforme discutido no Capítulo 2, as atividades relacionadas ao MEM são atividades de apoio à operação do submarino nuclear. Portanto, as orientações relacionadas ao MEM fazem parte do conceito de apoio logístico do submarino.

Cabe lembrar que os requisitos de referência para o MEM contemplados no conceito operacional (ou mais especificamente no conceito de apoio logístico) darão origem aos requisitos de suportabilidade relacionados ao MEM, conforme discutido no Capítulo 3 (item 3.3) e ilustrado na Figura 16.

Destaca-se o seguinte, as diretrizes para a realização do MEM presentes no conceito operacional, bem como os requisitos de suportabilidade associados, devem abranger tanto o submarino nuclear, quanto o seu sistema de apoio. A Figura 51 ilustra este fato e a Tabela 30 apresenta exemplos de requisitos de suportabilidade relacionados ao MEM, tanto para o submarino, quanto para o seu sistema de apoio.


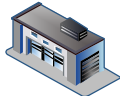



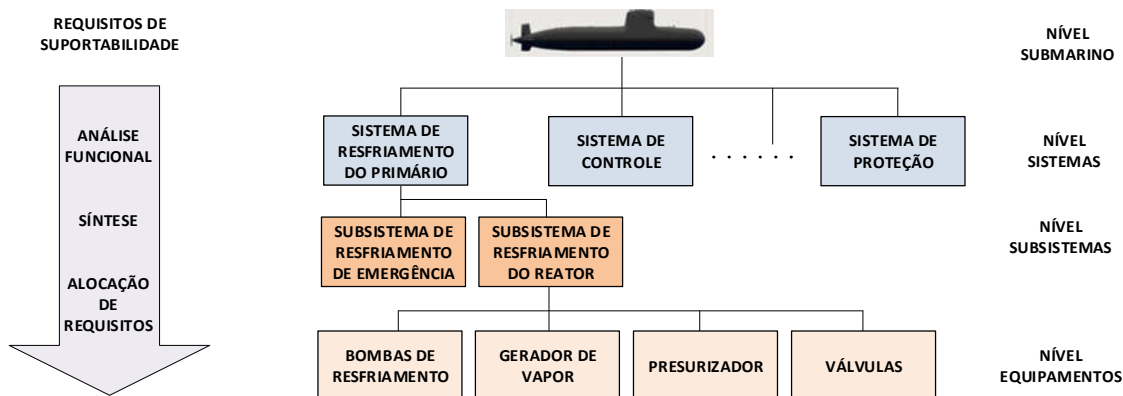
**Figura 51:** Requisitos de suportabilidade influenciando o submarino e seus sistemas de apoio

Os requisitos de suportabilidade devem ser aplicados aos diversos níveis da arquitetura do submarino e também do sistema de apoio. A Figura 52 ilustra a aplicação desses requisitos na concepção da arquitetura do submarino nuclear.



**Tabela 30:** Exemplos de requisitos de suportabilidade relacionados ao MEM

	<b>Exemplos de Requisitos de Suportabilidade</b>	<b>Influencia o</b>
<b>Relacionados ao Submarino</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O projeto do submarino deverá viabilizar o monitoramento da eficácia da manutenção;</li> <li>- Os ESC relacionados com a segurança nuclear deverão ser identificados em todos os níveis da arquitetura do submarino e ter suas funções claramente definidas;</li> <li>- Os ESC relacionados com a segurança nuclear deverão ter parâmetros de monitoramento de suas funções definidos pelo projetista;</li> <li>- O arranjo dos equipamentos na seção do reator deverá proporcionar a menor indisponibilidade de ESC no escopo da RM por ocasião de intervenções de manutenção;</li> <li>- Deverão ser definidos os espaços mínimos de manutenção para ESC no escopo da RM;</li> <li>- Os contratos de aquisição de ESC no escopo do RM deverão ter cláusulas relacionadas ao monitoramento da eficácia da manutenção;</li> <li>- Deverão ser realizados estudos de manutenibilidade, confiabilidade e de segurança para ESC no escopo da RM;</li> <li>- Os ESC no escopo da RM deverão ter claramente identificados e definidos os eventos iniciadores de acidentes associados a eles;</li> </ul>	<p><b>Submarino</b></p> 
<b>Relacionados ao Sistema de Apoio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As manutenções de ESC no escopo da RM devem ter mecanismos de rastreabilidade;</li> <li>- As manutenções de ESC no escopo da RM devem respeitar o ciclo de operação do submarino;</li> <li>- O sistema de apoio deve viabilizar o monitoramento da eficácia da manutenção;</li> <li>- O monitoramento da eficácia da manutenção deverá ser realizado por pessoal da Marinha do Brasil;</li> <li>- Deverá ser implementado um processo de monitoramento da eficácia da manutenção para itens relacionados com a segurança nuclear conforme requisitos da RM;</li> <li>- O programa de monitoramento da manutenção deverá usar abordagens probabilísticas e determinísticas;</li> <li>- As rotinas de manutenção de ESC no escopo da RM devem ser claramente definidas e identificadas;</li> <li>- Deverão ser identificadas as expertises necessárias para o pessoal relacionado ao processo de monitoramento da eficácia da manutenção;</li> <li>- Deverão ser identificados requisitos para aquisição de softwares necessários para apoiar o processo de monitoramento da eficácia da manutenção: APS, árvores de falha, registros de manutenção, FMECA, análise de causa raiz, etc.</li> <li>- Devem ser identificados equipamentos especiais de apoio e teste relacionados às rotinas de manutenção de ESC no escopo da RM;</li> </ul>	<p><b>OFICINAS</b></p>  <p><b>Sistema de Apoio ao submarino</b></p>  <p><b>PESSOAL</b></p>



**Figura 52:** Alocação de requisitos de suportabilidade nos diversos níveis da arquitetura do submarino nuclear

É digno de registro que as principais causas de insucesso no desenvolvimento de sistemas, especialmente os de alta complexidade, estão relacionadas com o entendimento claro das necessidades do cliente, e também com a elaboração de requisitos a partir dessas necessidades.

Com o objetivo de minimizar este tipo de problema, sugere-se que seja utilizado como referência o Processo de Definição de Requisitos e Necessidades dos *Stackholders*<sup>48</sup> da ISO/IEC/IEEE 15288 [5], para a elaboração do conceito operacional, e o Processo de Definição de Requisitos do Sistema (da mesma norma), para a elaboração dos requisitos de suportabilidade.

O conceito operacional (e os demais conceitos de ciclo de vida), bem como o conjunto de requisitos de suportabilidade constituem informação de planejamento logístico muito útil para a realização do MEM após a entrega do submarino nuclear para o setor operativo.

Em resumo, a discussão acima dá origem às seguintes orientações para o MEM do conjunto submarino nuclear e seu sistema de apoio:

- a) Deverá ser contemplado no Conceito Operacional do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio o modo como a Marinha do Brasil pretende realizar o planejamento, a execução e a melhoria do MEM;
- b) Para a elaboração do Conceito Operacional do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio sugere-se que seja considerado a ISO/IEC 29148 [27], e

<sup>48</sup> Todas as partes interessadas no desenvolvimento do submarino, incluindo, entre outros: o cliente, e órgãos reguladores e fiscalizadores.

utilizado o Processo de Definição de Requisitos e Necessidades dos *Stackholders* da ISO/IEC/IEEE 15288 [5].

- c) Sugere-se que seja considerado como requisito de alto nível para o MEM do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio os seguintes requisitos: Regra da Manutenção (10CFR50.65) [8], Item 12 da CNEN 1.21[3], e itens 20.1 e 20.3 da CNEN 1.26 [4].
- d) Sugere-se que seja utilizado o Processo de Definição de Requisitos do Sistema da ISO/IEC/IEEE 15288 [5] para a elaboração dos requisitos de suportabilidade do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio. [Nota: Deverá ser utilizado como entrada (informação a ser processada) para este processo o conceito operacional definido para o conjunto citado].
- e) O conceito operacional e os requisitos de suportabilidade deverão ser incorporados na configuração de referência do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio.
- f) Sugere-se que seja definido um processo de gestão de requisitos para gerenciar o desdobramento de requisitos ao longo do desenvolvimento do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio. [Nota: Para sistemas de alta complexidade, como um submarino nuclear a quantidade de requisitos cresce exponencialmente à medida que a arquitetura vai sendo elaborada].
- g) O conceito operacional, especialmente a parte que trata sobre o MEM, deverá ser utilizado na validação do sistema de apoio destinado a realizar o MEM para o conjunto submarino nuclear + sistema de apoio.

Considerando as orientações acima para a realização do MEM para o submarino nuclear, sugerem-se os seguintes produtos logísticos:

- a) Conceito operacional (OpsCon) do submarino nuclear apresentando as restrições e estratégia de planejamento e execução das atividades de MEM.
- b) Requisitos de suportabilidade relacionados ao MEM para o conjunto submarino nuclear e sistema de apoio alocados nos diversos níveis da arquitetura.

Em resumo, as orientações propostas acima viabilizam a concepção de estruturas, sistemas e componentes, tanto do submarino nuclear, quanto do seu sistema de apoio, que

permitem a realização de atividades relacionadas ao MEM nos diversos níveis da arquitetura.

## **6.2 Etapas de planejamento do MEM nas fases de design do submarino nuclear**

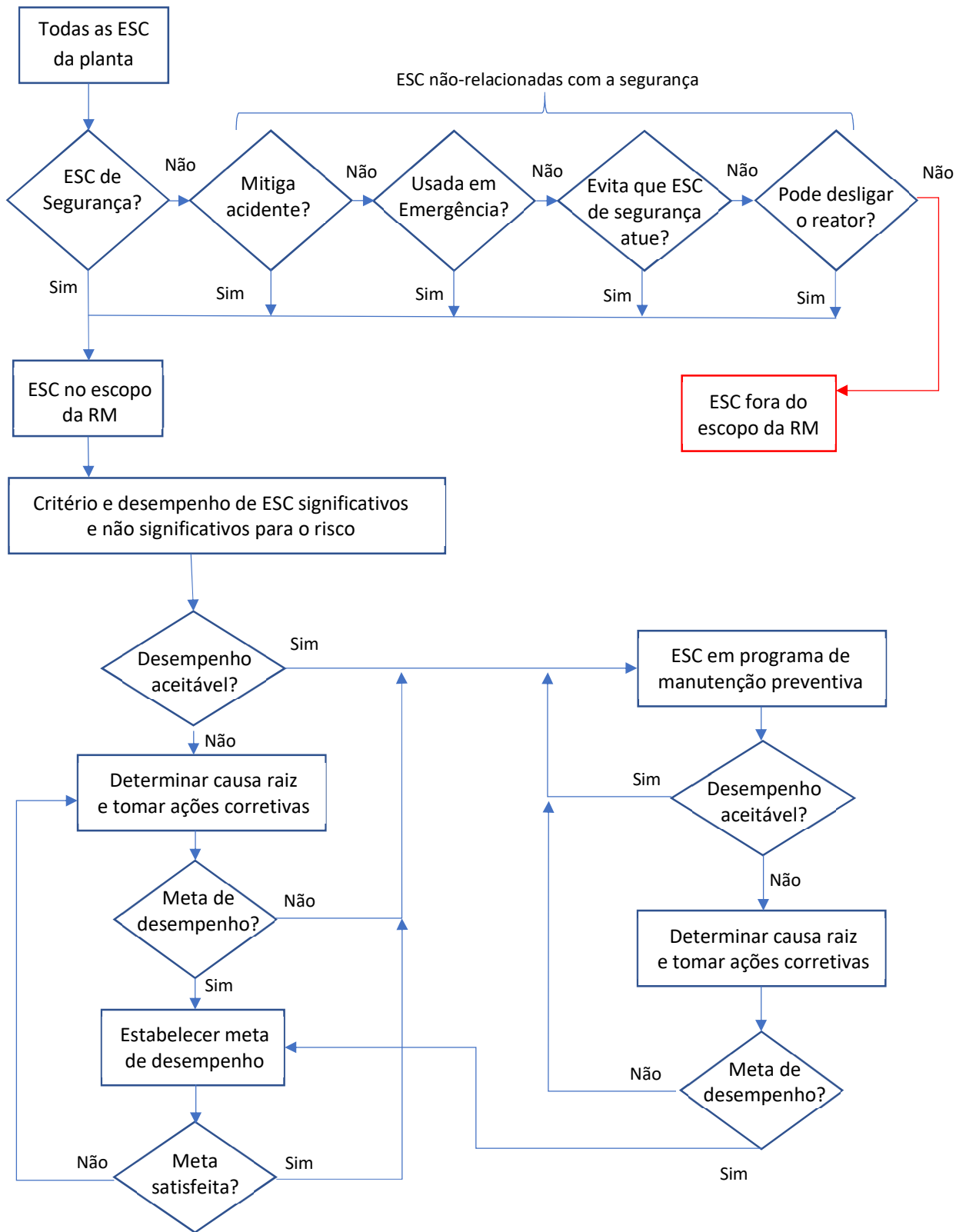
A consideração dos requisitos de alto nível apontados na seção anterior dão respaldo para a execução de atividades e tarefas necessárias para o planejamento do MEM nas fases de design de um submarino nuclear.

Observando a Tabela 1, o diagrama lógico [9] de implantação da RM apresentado na Figura 53, e a implantação do MEM em Angra 2 [12][61][62][63][64], é possível identificar as seguintes etapas para o planejamento do MEM nas fases de design de um submarino nuclear:

- a) Etapa 1 - Identificação de todas as ESC do conjunto submarino e sistema de apoio;
- b) Etapa 2 - Seleção das ESC no escopo do MEM;
- c) Etapa 3 - Identificação das funções do sistema no escopo do MEM;
- d) Etapa 4 - Determinação de ESC significativos para o risco;
- e) Etapa 5 - Identificação de Trecho Funcional e Grupo de Confiabilidade;
- f) Etapa 6 - Identificação dos Critérios de desempenho;
- g) Etapa 7 – Consideração da avaliação periódica do MEM e o perfil de utilização do submarino;
- h) Etapa 8 - Identificação/gestão das manutenções que impactam a segurança; e
- i) Etapa 9 - Determinação de programa de manutenção preventiva para as ESC no escopo do MEM.

Assim como as atividades e tarefas envolvidas na síntese de sistemas em geral, as etapas acima podem ser aplicadas de modo recursivo nos diversos níveis da arquitetura do submarino e do seu sistema de apoio, promovendo a identificação, definição e otimização das informações pretendidas ao longo das fases de design.

Sugere-se que a execução dessas etapas seja considerada no escopo de planejamento e execução das atividades da equipe responsável por construir a suportabilidade do submarino nuclear, ou seja, a equipe de ALI.

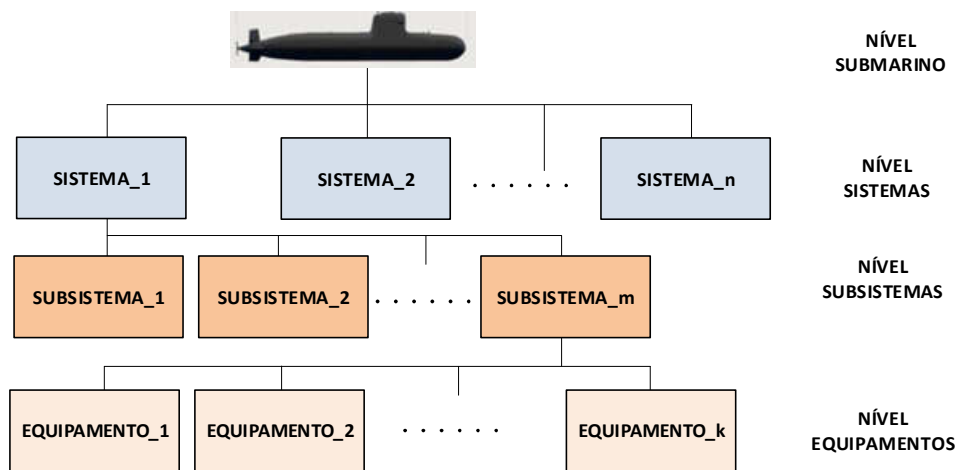


**Figura 53:** Diagrama lógico de implantação da RM  
**Fonte:** Adaptado de NUCLEAR ENERGY INSTITUTE [9]

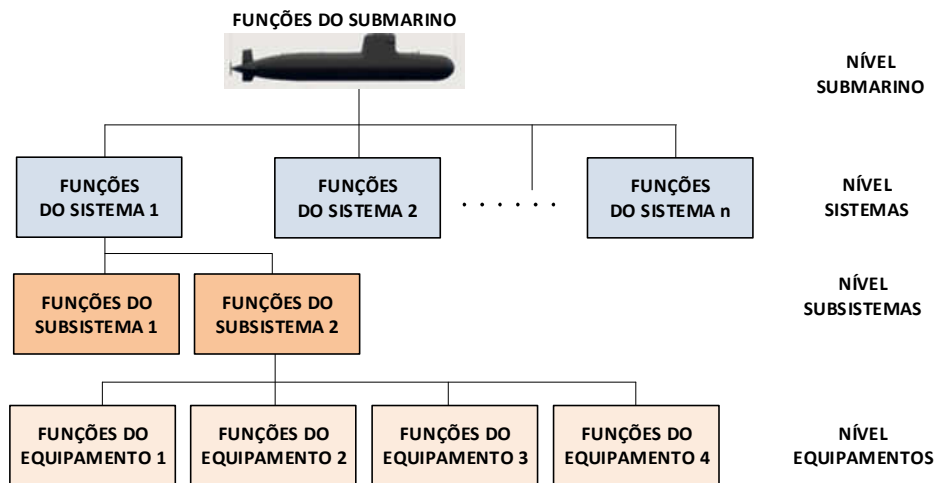
### 6.3 Identificação de todas as ESC do conjunto submarino e sistema de apoio

A identificação de todas as ESC de uma planta é decorrente da observação da arquitetura desta planta. Esta identificação será tão eficiente quanto mais bem definida for essa arquitetura.

Uma arquitetura bem definida decorre de uma análise/alocação funcional precisa, clara e abrangente do nível mais alto da arquitetura do sistema, o submarino, para os níveis mais baixos dessa arquitetura, os subsistemas, os equipamentos e/ou os componentes, conforme mostrado na Figura 54 e na Figura 55.



**Figura 54:** Exemplo de uma arquitetura que identifica as ESC nos níveis: sistemas, subsistemas, equipamentos e componentes



$$\text{FUNÇÕES (SUBMARINO)} = \text{FUNÇÕES (SISTEMA}_1) + \text{FUNÇÕES (SISTEMA}_2) + \dots + \text{FUNÇÕES (SISTEMA}_n)$$

**Figura 55:** Exemplo de desdobramento funcional da arquitetura do submarino

A realização bem-sucedida da Etapa 1 é fundamental para a seleção das ESC que farão parte do escopo de monitoramento (Etapa 2), demandando, portanto, uma atenção redobrada na determinação e controle das ESC que constituirão a arquitetura do SN-BR e seu sistema de apoio.

Para auxiliar o controle das ESC que fazem parte da arquitetura de um sistema é fundamental que se tenha um processo de gestão de configuração definido, implantado e bem gerido. A arquitetura do submarino nuclear e do seu sistema de apoio deverá ser considerada como um item de configuração, devendo ser monitorado de forma permanente pela equipe que planeja a implantação do MEM.

### **Lições aprendidas na identificação de todas as ESC em usinas comerciais**

Vajgel [64] afirma que na realização desta etapa em Angra 2 foram identificadas todas as ESC da usina, independente da classe de segurança. A sistemática do Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção (PMEM) [12] aponta que esta tarefa atualmente é realizada com o auxílio do software MAXIMO<sup>49</sup>. São exemplo de algumas dessas ESC:

- a) LAB – Sistema da água de alimentação.
- b) LAC – Bombas da água de alimentação.
- c) LAS – Bombas de alimentação de emergência
- d) LBA – Sistema de Vapor principal
- e) KU – Sistemas de amostragem de material nuclear.
- f) KTE – Sistema de coleta, e descarga das válvulas de segurança.

O guia da indústria de implantação da RM, o NUMARC 93-01 Rev. 4E [9], aponta que esta seleção de ESC para o escopo de MEM é realizada a partir de todas as estruturas, sistemas, e componentes pertencentes à planta.

A Tabela 31 apresenta a quantidade total de ESC pertencentes a nove usinas nucleares comerciais por ocasião da avaliação da implantação da RM nos EUA.

---

<sup>49</sup> MAXIMO é um software de gestão de ativos da empresa IBM. Disponível em <www.ibm.com>

**Tabela 31:** Quantidade total de ESC de nove usinas nucleares comerciais dos EUA que implementaram o MEM

**Fonte:** NRC [10]

Planta avaliada	Nº de Loops	Total de ESC da planta	Total de ESC no escopo do RM
BWR/3	3	102	67
BWR/4	4	131	86
BWR/6	6	341	127
WEST 3 Loop	3	205	115
WEST 4 Loop	4	176	103
WEST 4 Loop	4	194	100
WEST 4 Loop	4	112	76
CE	Não informado	160	110
B&W	Não informado	137	90

As usinas apontadas pela Tabela 31 apresentaram em média 170 ESC. Cabe destacar que no caso do submarino nuclear, esse número pode ser maior, uma vez que devem ser consideradas todas as ESC pertencentes exclusivamente ao submarino, e outras tantas pertencentes ao seu sistema de apoio. Talarico [65] aponta pelo menos 25 sistemas (somente infraestruturas) pertencentes ao sistema de apoio para um submarino nuclear de ataque. Alguns exemplos:

- a) Sistema de manutenção e reparo;
- b) Sistema de troca de combustível;
- c) Sistema de encalhe e docagem;
- d) Sistema de manutenção convencional;
- e) Sistema de manutenção nuclear;
- f) Sistema de troca e recarga;
- g) Sistema de armazenamento de combustível novo;
- h) Sistema de armazenamento de combustível do reator;
- i) Sistema de gerenciamento de rejeitos;
- j) Sistema de descontaminação;
- k) Sistema de monitoração e proteção radiológica;
- l) Sistemas de serviços essenciais nuclear.



## 6.4 Orientações para a identificação e definição das ESC do SN-BR

Considerando o requisito (a)(1) da RM que aponta a necessidade de seleção de ESC para compor o escopo de monitoramento a partir do conjunto geral de ESC da arquitetura de uma usina, sugerem-se as seguintes orientações para o projeto do submarino nuclear:

- a) É necessário que a equipe de projetistas elabore para o submarino uma arquitetura abrangente, clara e precisa decorrente de uma análise funcional que contemple os diversos níveis de sistema.
- b) Sugere-se que os projetistas de ALI acompanhem a elaboração, registro e controle da configuração da arquitetura completa do SN-BR e do seu sistema de apoio durante as fases de *design* (concepção, desenvolvimento e produção).
- c) Na definição da arquitetura, e dos ESC que a compõe, sugere-se utilizar os seguintes processos da ISO/IEC/IEEE 15288:2015 [5]: Processo de definição de arquitetura e Processo de definição de *design*.
- d) Por ocasião da entrega do submarino e do seu sistema de apoio para o setor operativo, sugere-se que seja entregue uma lista contendo todos os ESC deste conjunto, independente de classe de segurança, além do registro dessas informações em um banco de dados (banco de dados de apoio logístico). Esta lista de ESC deverá identificá-los nos diversos níveis da arquitetura (nível submarino, nível sistemas, nível subsistemas, nível equipamentos e/ou componentes), conforme ilustrado na Figura 54.
- e) Identificar e definir as funções que devem ser realizadas pelo conjunto (submarino nuclear + sistema de apoio), organizadas em todos os níveis da arquitetura.
- f) Identificar todas as funções executadas para cada um dos ESC pertence a estrutura do conjunto (submarino nuclear + sistema de apoio).

As orientações acima dão origem aos seguintes produtos logísticos:

- a) Lista contendo todos os ESC do submarino independente de classe de segurança, organizadas nos seguintes níveis da arquitetura: sistemas, subsistemas, componente e/ou componentes.
- b) Lista de funções executadas para cada um dos ESC pertence a estrutura do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio.

A Tabela 32 apresenta exemplos de atributos logísticos relacionados ao Produtos citados acima visando sua inclusão em banco de dados.

**Tabela 32:** Exemplos de atributos logísticos associados com a classe de segurança de ESC do SN-BR

Atributo Logístico	Descrição
Identificação do ESC	Código que identifica unicamente o elemento de arquitetura (ESC)
Descrição do ESC	Breve descrição do elemento de arquitetura (ESC).
Nível de arquitetura do ESC	Código que indica o nível de arquitetura que o ESC está localizado. <b>Exemplo:</b> A = Nível Sistema; B = Nível Subsistema; C = Nível Equipamento.
Nível de Segurança do ESC <sup>50</sup>	Código que identifica se o ESC realiza, ou não, função envolvida com a segurança nuclear. <b>Exemplo:</b> 01 → ESC <b>relacionado</b> com a segurança nuclear. (Escopo da RM) 02 → ESC <b>não relacionado</b> com a segurança nuclear. (Escopo da RM) 03 → ESC <b>sem qualquer relação</b> com a segurança nuclear. (Fora do escopo da RM)

Cabe ressaltar que a não disponibilização deste tipo de informação em um banco de dados pode impactar de forma considerável o tempo de implantação de um programa desta natureza.

### 6.5 Seleção das ESC e identificação de funções no escopo do MEM

A seleção de ESC relacionados com a segurança e ESC não relacionados com a segurança deve ser realizada com base na observação das funções realizadas por todas as ESC da arquitetura do conjunto submarino e sistema de apoio.

O sucesso de tal tarefa está diretamente ligado à existência de um conjunto claro, preciso e abrangente de funções para cada elemento da arquitetura do submarino e do seu sistema de apoio, conforme ilustrado na Figura 55.

Vale destacar que um elemento de arquitetura pode realizar uma ou mais funções que não necessariamente estão relacionadas com a segurança nuclear. Por exemplo, na Figura

<sup>50</sup> Os projetistas poderão também incluir nesse item outros códigos de segurança, tais como os relacionados à: segurança da imersão; segurança da navegabilidade; etc.

56 o elemento\_de\_arquitetura\_1 desempenha tanto funções de natureza de segurança nuclear (Fun\_Seg\_1 e Fun\_Seg\_2) quanto função sem qualquer natureza com a segurança nuclear (Função\_1). Já os elementos de arquitetura 2 e 3 desempenham apenas funções de mesma natureza, a saber, nuclear e sem qualquer natureza nuclear, respectivamente.

Função (elemento\_de\_arquitetura\_1) = **Função\_1** + **Fun\_Seg\_1** + **Fun\_Seg\_2**.

Função (elemento\_de\_arquitetura\_2) = **Fun\_Seg\_1** + **Fun\_Seg\_2**.

Função (elemento\_de\_arquitetura\_3) = **Função\_1**.

**Figura 56:** Elementos de arquitetura desempenhando uma ou mais funções. As funções podem ser de natureza diferentes.

### **Orientações do guia de implantação da indústria – NUMARC 93-01 [9]**

O guia de implantação da RM para a indústria orienta que deve ser incluído no escopo de monitoramento as ESC que podem afetar direta ou indiretamente a operação da planta, independente de qual instituição esteja responsável pela sua manutenção. Como exemplo, é citada a subestação de distribuição de energia elétrica localizada fora dos limites do primário e do secundário, que pode, mediante avaliação, ser incluída no do escopo de monitoramento.

Este guia orienta também que as ESC que realizam múltiplas funções devem ser incluídos no escopo de monitoramento apenas pelas funções que estão relacionadas com a segurança, devendo, para isso, ser identificadas todas as funções e falhas das ESC incluídos no escopo de monitoramento.

Outra orientação muito importante feita por esse guia é que deve ser identificada a função que deixa de estar disponível quando o sistema entre em manutenção.

### **Lições aprendidas na seleção de ESC e funções para o escopo de MEM**

Conforme apresentado por Vajgel [64], o início da implantação do PMEM em Angra 2 aconteceu em 2006, levando aproximadamente dois anos para a identificação dos ESC que fariam parte daquele programa. Em 2009, o PMEM já havia selecionado 114 sistemas e subsistemas para o seu escopo de monitoramento.

Em Angra 2 os sistemas selecionados para o escopo do PMEM foram identificados por meio de formulário semelhante ao mostrado na Figura 57.

Para a determinação das ESC não relacionados com a segurança, cuja falha poderia impedir a realização de uma função relacionada com a segurança, foi consultado [12] o Capítulo 15 do Relatório de Análise de Segurança (FSAR) que trata de análise de acidentes.

Código do ESC	Nome do ESC	ESC relacionado à segurança?	ESC não relacionado com a segurança				Incluir no PMEM?
			Utilizado em POE?	Mitiga acidentes?	Ao falhar impede a função de segurança?	Ao falhar provoca desligamento do reator?	
<i>SS1</i>	<i>Sistema 1</i>	<i>sim</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>
<i>SS2</i>	<i>Sistema 2</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>
<i>SSE1</i>	<i>Equipamento 1</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>
<i>SSE3</i>	<i>Equipamento 3</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>
<i>SE2</i>	<i>Estrutura 2</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>

**Figura 57:** Exemplo de formulário para identificação de ESC no escopo do PMEM  
**Fonte:** Adaptado de ELETRONUCLEAR [12]

A equipe da NRC que avaliou a implantação da RM nos EUA identificou que, de um modo geral, as nove usinas conseguiram selecionar de forma satisfatória os ESC que fariam parte do escopo de monitoramento. Entretanto, eles identificaram que algumas plantas deixaram de fora do escopo de monitoramento os seguintes sistemas: (1) botões indicadores de processo da planta localizados na sala de controle (*control room annunciators*)<sup>51</sup>; (2) sistema de aterramento da planta; e (3) sistema de água de circulação. A Tabela 34 apresenta a justificativa apresentada pelas plantas para não incluírem estes itens no escopo do programa.

<sup>51</sup> *Annunciators* refere-se a um grupo de botões retro iluminados, geralmente agregados em um painel, que informam o estado ou condição de parâmetros de processo de uma planta industrial.

**Tabela 33:** ESC não considerados no escopo de monitoramento e posicionamento da NRC  
**Fonte:** NRC [10]

ESC não incluído no escopo da RM	Justificativa da planta e comentário do órgão regulador
(1) Botões indicadores de processo da planta localizados na sala de controle	<p><b>Justificativa da planta:</b> Os indicadores de processo, que constituem sistema não-relacionado com a segurança utilizado em POE, não contribuem de forma significativa para o risco por serem redundantes com outros sistemas, tais como registrador de gráfico e ponteiro de medição.</p> <p><b>Comentário da NRC:</b> Estes indicadores agregam valor significativo para a função de mitigação de eventos indesejados por fornecerem os primeiros avisos de parâmetros fora do esperado ou a ocorrência de um acidente.</p>
(2) Sistemas de aterramento da planta	<p><b>Justificativa da planta:</b> Este sistema, classificado como ESC não-relacionado com a segurança, foi excluído do escopo da RM por não ter apresentado problemas significativos no período analisado.</p> <p><b>Comentário da NRC:</b> A equipe de avaliadores esclarece que devem ser incluídos os “ESC não-relacionados com a segurança <b>que podem causar</b> o desligamento do reator ou a atuação de um sistema de segurança independente se estes ESC têm apresentado falhas, ou não, no período analisado.</p>
(3) Sistema de água de circulação	<p><b>Justificativa da planta:</b> Este sistema, classificado como ESC não-relacionado com a segurança, <b>que podem causar</b> o desligamento do reator ou a atuação de um sistema de segurança, foi inicialmente considerado, mas totalmente descartado em um segundo momento pelos seguintes fatos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Alta confiabilidade e arquitetura redundante;</li> <li>(2) Ter tempo suficiente para atuação do operador no caso da ocorrência de eventos acidentais improváveis.</li> <li>(3) Não causar diretamente o desligamento do reator.</li> <li>(4) Não haver apresentado histórico de falhas.</li> </ul> <p><b>Comentário da NRC:</b> Os ESC não-relacionados com a segurança, <b>que podem causar</b> o desligamento do reator ou a atuação de um sistema de segurança devem ser incluídos no escopo de monitoramento independentemente se causam o desligamento do reator de forma direta ou indireta, não devendo ser considerado também como critério de inclusão ou exclusão o seu histórico de falhas.</p>

Ao final da avaliação de todas as usinas inspecionadas os avaliadores da NRC recomendaram não utilizar as seguintes justificativas para excluir uma ESC do escopo de monitoramento:

- a) A ESC é muito confiável, ou não tem apresentado falha durante operação;
- b) Trechos redundantes irão evitar que o sistema venha a falhar;
- c) O operador evitará que a falha do sistema cause o desligamento do reator;
- d) A falha do sistema não causa diretamente o desligamento do reator.

Os avaliadores da NRC identificaram também que os seguintes sistemas deveriam fazer parte do escopo de monitoramento de uma planta em particular dentre as nove analisadas:

- a) Tanque de água de blindagem que separa o primário do compartimento dos geradores;
- b) Sistema de computadores da planta;
- c) Proteção térmica (calor e congelamento);
- d) Monitoramento da vibração da bomba de refrigeração do reator;
- e) Sistema de proteção catódica;
- f) Sistema de extração de vapor;
- g) Remoção de ar condensado;
- h) Sistema de óleo lubrificante da turbina;
- i) Sistema de óleo selador da turbina.

## **6.6 Orientações para a definição de ESC e funções no escopo de MEM do SN-BR**

Considerando os requisitos da RM e a experiência de aplicação da indústria, sugerem-se as seguintes orientações para o caso do SN-BR:

- a) Elaborar lista contendo todas as funções desempenhadas para cada elemento da arquitetura do submarino e do seu sistema de apoio, independente de classe de segurança.
- b) Para cada função desempenhada por um elemento pertencente à arquitetura do conjunto submarino + sistema de apoio deverá ser identificada a falha que a torna indisponível (falha funcional).

- c) Identificar a forma como as falhas funcionais se apresentam (os modos de falhas), especialmente para as falhas funcionais relacionadas com ESC relacionado, ou não relacionado, com a segurança.
- d) Utilizar a análise funcional como método de inclusão de ESC no escopo de monitoramento do MEM para o conjunto submarino + sistema de apoio.
- e) Deverão ser identificados para o conjunto submarino + sistema de apoio os grupos de ESC que, juntos, desempenham uma função incluída no escopo do MEM. Esses grupos poderão ser denominados de trecho funcional ou trem funcional.
- f) Identificar e definir as tarefas de manutenção que mitigam os modos de falha funcionais de ESC incluídos no escopo de monitoramento no plano de manutenção do conjunto submarino + sistema de apoio.
- g) Os projetistas de ALI deverão trabalhar junto aos projetistas do sistema, especialmente na definição/alocação funcional, a fim de garantir que sejam identificadas e definidas todas as funções dos elementos de arquitetura pertencentes ao conjunto submarino + sistema de apoio.
- h) Os projetistas de ALI deverão participar das principais revisões técnicas<sup>52</sup> de projeto (especialmente a Revisão Técnica Funcional) que ocorrem nas fases de *design* (concepção, desenvolvimento e produção) a fim de garantir que a definição do projeto do conjunto submarino + sistema de apoio incorpore características associadas às funções desempenhadas por ESC de segurança.
- i) Acompanhar qualquer alteração na configuração funcional do conjunto submarino + sistema de apoio ao longo das fases de *design*, realizando a atualização no conjunto de funções no escopo de MEM, caso necessário.

A consideração das orientações acima dá origem aos seguintes produtos logísticos necessários para a realização do MEM na operação do conjunto (submarino nuclear + sistema de apoio):

- a) As funções de todos os elementos da arquitetura do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio e seus modos de falha;

---

<sup>52</sup> Consultar a Seção 3.6 deste trabalho para as principais revisões técnicas de projeto.

- b) Todas as funções (relacionadas com a segurança ou não) de ESC selecionados para o escopo de MEM pertencentes à arquitetura do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio, e seus modos de falha.
- c) ESC do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio selecionados para o escopo de MEM.
- d) Funções de segurança dos ESC selecionados para o escopo de MEM.
- e) Tarefas de manutenção que mitigam modos de falha funcional relacionados aos ESC selecionados para o escopo do MEM.

A Tabela 34 apresenta exemplos de atributos logísticos relacionados aos produtos acima, visando sua inclusão em banco de dados.

**Tabela 34:** Exemplos de atributos logísticos relacionados a funções desempenhadas por ESC

Atributo Logístico	Descrição
Identificação do ESC	Código que identifica o elemento de arquitetura (ESC)
Nível de Arquitetura do ESC	Código que identifica o nível de arquitetura no qual o ESC está localizado. Exemplo: <b>A</b> → Nível Sistema <b>B</b> → Nível Subsistema <b>C</b> → Nível Equipamento
Identificação de Função do ESC	Código que identifica unicamente uma função desempenhada por um ESC do submarino.
Descrição de Função do ESC	Descrição de uma função realizada por um ESC da arquitetura.
Nível de Segurança da Função	Código que identifica se a função tem alguma relação com a segurança nuclear. Exemplo: <b>1</b> → Função <b>relacionada</b> com a segurança nuclear; <b>2</b> → Função <b>não relacionada</b> com a segurança nuclear;

### 6.7 Determinação de ESC significativos para o risco para o submarino

Seguindo orientação do guia NUMARC 93-01 [9], a determinação da significação para o risco de ESC pertencente ao conjunto submarino e sistema de apoio deve utilizar tanto métodos probabilísticos (análise probabilística de segurança; manutenção centrada em confiabilidade; etc.) quanto métodos determinísticos.



Melo [66] define a análise probabilística de segurança (APS) como:

Um método estruturado e sistemático para a quantificação do potencial de perdas e ganhos de uma planta industrial. É um método de avaliação e ordenação de riscos diversos visando contribuir para a tomada de decisões mais consistentes.

Segundo Melo [66], a APS de centrais nucleares pode quantificar o risco dividido nos seguintes níveis: (1) danos ao núcleo; (2) danos à contenção; (3) risco social. A natureza dos riscos calculados em cada um desses níveis é apresentada na Tabela 35.

**Tabela 35:** Níveis de quantificação do risco de APS de centrais nucleares.

**Fonte:** MELO [66].

(1) Dano ao núcleo	(2) Danos à contenção	(3) Risco social
<ul style="list-style-type: none"><li>- Identifica as sequências de eventos que podem conduzir a danos ao núcleo;</li><li>- Estima a frequência de danos ao núcleo;</li><li>- Fornece indicações dos pontos fortes e das limitações dos sistemas de segurança e dos procedimentos disponíveis para evitar danos ao núcleo.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Identifica as maneiras pelas quais as liberações radioativas da planta podem ocorrer e estima as suas magnitudes e frequências;</li><li>- Fornece indicações adicionais da importância relativa de medidas de prevenção e de mitigação de acidentes, tais como a contenção do reator.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Calcula o risco social, combinando as frequências e consequências das sequências acidentais para cada evento iniciador identificado para a planta;</li><li>- Calcula, também, as curvas de risco (frequência acumulada complementar);</li><li>- Realiza uma análise de incertezas no valor pontual do risco e também nas curvas de risco obtidas.</li></ul>

### **Lições aprendidas da implantação do MEM em outras usinas**

A comissão de avaliadores da NRC identificou que para a determinação dos ESC significativos para o risco, as nove plantas comerciais que implantaram a RM consideraram:

- a) o uso de comitês de especialistas;
- b) o uso de métodos probabilísticos (APS) e métodos determinísticos (método Delphi [67,68]);

- c) que os métodos probabilísticos (APS) foram limitados, uma vez que nem todos os ESC estavam modelados em árvores de eventos ou diagramas de blocos.

Em Angra 2, foi realizada a APS de nível 1, com a estimativa da frequência de danos ao núcleo quantificado por meio das seguintes importâncias apontadas por Vajgel [64]:

- a) **Frequência de Dano ao Núcleo (FDN):** considera os eventos<sup>53</sup> iniciadores de acidente incluídos nos conjuntos mínimos de falhas que ordenados decrescentemente, contribuem cumulativamente em até 90% da FDN total.
- b) **Taxa de Redução de Risco (RRR):** considera os eventos iniciadores de acidente cujo valor de sua taxa de redução do risco é maior que 1,005.
- c) **Taxa de Incremento de Risco (RIR):** considera eventos iniciadores de acidente cujo valor de sua medida de incremento ao risco é maior que 2.

O método determinístico Delphi [67,68] é utilizado para determinação da significação para o risco definindo-se a contribuição de cada ESC para o desempenho das Funções Críticas de Segurança (FCS). Vajgel [64] cita que Angra 2 considerou as seguintes FCS:

- a) Subcriticalidade;
- b) Transporte de calor lado primário;
- c) Inventário do refrigerante do lado primário;
- d) Fonte fria do lado secundário;
- e) Alimentação do gerador de vapor;
- f) Integridade do circuito primário;
- g) Liberação de radioatividade.

No método Delphi um comitê de especialistas atribui fatores de peso (por exemplo, valores entre “0”, não contribui, e “10” para contribuição máxima) a cada um dos ESC no escopo do monitoramento.

Ao final da atribuição de pesos, são realizadas médias ponderadas e quantificada a contribuição de cada ESC para as FCS. O comitê define um “valor de referência” para as contribuições com as FCS. Os ESC com contribuição acima desse valor de corte são

---

<sup>53</sup> São exemplos de eventos iniciadores de acidente: ruptura de tubulação do primário; indisponibilidade de energia elétrica; perda da água de alimentação dos geradores de calor, etc.

definidos como significativos para o risco, os demais são definidos como não significativos para o risco.

Nesse tipo de avaliação, cada especialista tem autonomia para atribuir um fator de peso ao ESC sob análise conforme a sua experiência profissional. Em Angra 2, o comitê de avaliação conta com especialistas nas seguintes áreas: (1) engenharia de sistema; (2) segurança nuclear; (4) operação; e (5) manutenção.

A experiência profissional e o quantitativo de pessoal desejados para os membros do comitê de avaliação em Angra 2 são [12]:

- a) Análise Probabilística de Segurança: 1 pessoa com experiência mínima de 3 anos.
- b) Engenharia de Desempenho de Sistemas e Reator: 1 pessoa com experiência mínima de 3 anos.
- c) Engenharia de Manutenção: 1 pessoa com experiência mínima de 3 anos.
- d) Operação: 1 pessoa com experiência mínima de 3 anos.
- e) Planejamento e Programação de atividade de manutenção: 1 pessoa com experiência mínima de 3 anos.

No contexto do PMEM, são algumas responsabilidades do comitê de avaliação [12]:

- a) Selecionar os ESC para o escopo do PMEM;
- b) Determinar os ESC significativos para o risco;
- c) Determinar os trechos funcionais e correspondentes critérios de desempenho.
- d) Analisar e aprovar os relatórios emitidos pelo programa, incluindo ações corretivas, caso necessário;
- e) Identificar os ESC que demandam um acompanhamento especial.

## **6.8 Orientações para a identificação de ESC significativas para o risco no SN-BR**

Face ao exposto, sugerem-se as seguintes orientações para a identificação de ESC significativas para o risco a ser realizada durante as fases de *design* do conjunto submarino nuclear + sistema de apoio:

- a) Utilizar abordagens probabilísticas (APS) e determinísticas (método Delphi);

- b) Utilização das seguintes referências para o método Delphi: NUREG/CR 5424 [67] e NUREG/CR-4962 (PLG 0533) [68];
- c) Calcular a contribuição de frequência de dano ao núcleo nas abordagens probabilísticas (APS nível 1).
- d) Realizar estudos de manutenção centrada em confiabilidade (MCC) para identificar os sistemas mais críticos (mais significativos para o risco).
- e) Definir para as ESC mais críticas identificadas na MCC os mecanismos de monitoramento preditivo embarcado, ou não (monitoração local ou remota de vibração, temperatura, etc.)
- f) Definir os requisitos das ferramentas computacionais que apoiam os estudos probabilísticos, devendo ter suporte no mínimo a: árvores de falha; árvore de eventos, análise de causa raiz, diagrama de blocos, redes bayesianas, etc.
- g) Modelar as ESC significativas para o risco por meio de: árvores de falha; árvore de eventos, e diagrama de blocos.
- h) Realizar e registrar estudos probabilísticos associados aos eventos iniciadores de acidentes relacionados as ESC significativas para o risco.
- i) Utilizar um comitê de especialistas para selecionar as ESC significativas para o risco, com formação nas seguintes áreas: engenharia de sistemas; operação de reatores; operação de submarino; manutenção; apoio logístico integrado; segurança nuclear; radioproteção. [Nota: sugere-se que estes especialistas acompanhem todo o planejamento do MEM durante as fases de *design* para haver ganho de experiência].
- j) Definir as competências desejadas para os especialistas do comitê de avaliação, bem como um plano de qualificação.
- k) Identificar e definir um conjunto de FCS para o conjunto submarino + sistema de apoio.

A consideração das orientações acima dá origem aos seguintes produtos logísticos necessários para a realização do MEM relativo à determinação de ESC significativas para o risco:

- a) Lista de ESC significativas e não significativas para o risco para o conjunto submarino + sistema de apoio;

- b) Valores de significação para o risco para cada ESC no escopo de monitoramento do conjunto submarino + sistema de apoio; [Exemplo: contribuição para a frequência de dano ao risco, confiabilidade, ou outro valor atribuído pelo método determinístico]
- c) Métodos utilizados para determinação das ESC significativas para o risco;
- d) Lista de softwares de apoio ao desenvolvimento dos métodos probabilísticos e determinísticos, e suas documentações. (nota: a documentação deverá apontar o treinamento para novos usuários);
- e) Lista dos eventos iniciadores de acidentes para cada ESC no escopo de monitoração;
- f) Árvores de eventos e diagramas de blocos para as ESC incluídas no escopo de monitoramento do MEM;
- g) Lista de Funções Críticas de Segurança para o conjunto submarino nuclear + sistema de apoio.

### **6.9 Determinação de funções e trechos funcionais no desenvolvimento de sistemas**

Uma das principais atividades utilizadas na síntese de sistemas, após a definição de requisitos, é a análise funcional. Blanchard [18] afirma que a descrição funcional de um sistema serve como uma base para a identificação dos recursos necessários para este sistema cumprir sua missão. Este mesmo autor define “função” da seguinte forma: “uma ação discreta ou específica (ou uma série de ações) que é necessária para atingir um objetivo específico.”

Em um primeiro momento são identificadas todas as funções do nível mais alto da arquitetura, o próprio submarino. Como dito, essas funções são aquelas necessárias para o submarino cumprir sua missão. Veja exemplos de funções relacionadas ao cumprimento de uma missão de patrulha costeira atribuída a um submarino nuclear:

- a) **F1-** Fornecer energia, a partir de uma planta nuclear, para o deslocamento do submarino e demais sistemas de bordo;
- b) **F2-** Identificar o trânsito de outras embarcações na zona de patrulha;
- c) **F3-** Se deslocar dentro da zona de patrulha com velocidade de até 20 nós;
- d) **F4-** Ser capaz de lançar minas e torpedos para negar o uso do mar na zona de patrulha;

- e) **F5-** Prover meios para a acomodação e alimentação da tripulação durante o período de patrulha;
- f) **F6-** Ser capaz de realizar pequenas manutenções nos sistemas de bordo durante o período de patrulha.

Uma vez definidas todas as funções para o atendimento da missão proposta, estas são alocadas, ou organizadas em conjuntos de funções de mesma natureza, formando o próximo nível da arquitetura do submarino, o nível de sistemas. Por exemplo, as funções citadas acima poderiam compor os seguintes sistemas:

- a) Sistema nuclear de fornecimento de vapor. Inclui a função F1.
- b) Sistema de navegação. Inclui a função F2.
- c) Sistema de propulsão. Inclui a função F3.
- d) Sistema de combate. Inclui a função F4.
- e) Sistema de habitabilidade. Inclui a função F5.
- f) Sistema de manutenção embarcada. Inclui a função F6.

Seguindo essa mesma ideia, a formação dos níveis subsequentes (subsistemas, equipamentos e componentes) ocorre a partir da análise funcional de cada uma das funções pertencentes ao nível de sistemas. Veja por exemplo o desdobramento funcional da função F1, dando origem ao nível de subsistemas:

- a) **F1.1-** Promover a elevação de temperatura do refrigerante presente no lado primário de um reator do tipo PWR;
- b) **F1.2-** Promover a transferência de calor entre o lado primário e o lado secundário, gerando vapor para o lado secundário.
- c) **F1.3-** Transformar a energia contida vapor presente no lado primário em energia elétrica para o sistema elétrico do navio;
- d) **F1.4-** Promover a troca de calor entre o circuito secundário e o mar.

As funções propostas acima para o nível de subsistemas poderiam ser organizadas nos seguintes subsistemas:

- a) Subsistema de fissão nuclear. Inclui a função F1.1.
- b) Subsistema de resfriamento do reator. Inclui a função F1.2.
- c) Subsistema de vapor. Inclui a função F1.3.

d) Subsistema de condensado. Inclui a função F1.4.

Os subsistemas citados acima fariam parte do sistema nuclear de fornecimento de vapor. Cabe ressaltar que a análise funcional é acompanhada por um desdobramento e consequente alocação de requisitos para cada uma delas.

Blanchard [18] destaca que em um primeiro momento, para um determinado nível da arquitetura, a análise funcional é realizada definindo-se apenas o “que” será executado, ou seja, a própria função. Em um segundo momento, agrega-se valor a cada uma das funções propostas alocando-se os requisitos definidos no nível acima, permitindo a partir daí a definição de “como” elas serão executadas, por exemplo, executadas por estruturas, sistemas, subsistemas, equipamentos, componentes, pessoas, dados, etc.

Blanchard [32] aponta que a definição funcional no mais alto nível do sistema é realizada na fase de concepção, e o seu desdobramento para os demais níveis (subsistemas, etc.) são realizados a partir da fase de desenvolvimento. A Tabela 36 apresenta as atividades de elaboração funcional ao longo das fases de *design*.

Note que deste modo a identificação e definição dos trechos funcionais e grupos de confiabilidade realizada durante as fases de concepção, desenvolvimento e produção é feita gradualmente e de forma *top-down* (de cima para baixo).

**Tabela 36:** Principais atividades realizadas nas fases de *design* relacionadas com a síntese de sistemas

**Fonte:** Adaptada de Blanchard [32]

Concepção	Desenvolvimento		Produção
<i>design</i> conceitual	<i>design</i> preliminar	desenvolvimento e <i>design</i> detalhado	produção e construção
Identificação de necessidades; Análise de requisitos; Requisitos operacionais; Conceito de apoio logístico e de manutenção; Seleção de abordagens técnicas; <b>Definição funcional do sistema:</b> planejamento do projeto/programa.	<b>Análise funcional;</b> Alocação de requisitos; Estudos comparativos; Síntese do sistema; Design preliminar; Teste e avaliação de <i>design</i> conceitual (protótipos); Plano de aquisições; Contratação;	<b>Design de subsistemas e componentes;</b> Estudos comparativos e avaliação de alternativas; Desenvolvimento de modelos e protótipos; Verificação do processo de produção e fabricação;	Produção e/ou construção dos componentes do sistema; Atividades de produção de fornecedores; Testes de aceitação; Distribuição e operação do sistema; Avaliação e teste operacional do sistema e do sistema de apoio;

## **Lições aprendidas da implantação do MEM em outras usinas**

Seguindo a orientação do NUMARC 93-01 [9] para realizar o monitoramento dos ESC no escopo do programa privilegiando seu aspecto funcional, o processo de implementação do PMEM em Angra 2 realizou a identificação de trechos funcionais e grupos de confiabilidade. Vajgel [64] cita que o PMEM adota as seguintes definições para trecho funcional e para grupo de confiabilidade, respectivamente:

Composto por um ou mais componentes e tubulações, delimitados em pontos chaves, de forma a atender a uma ou mais funções específicas no escopo do PMEM, para o qual a falha funcional de um componente é a falha funcional do agrupamento.

Agrupamento de componentes, com as mesmas características funcionais, para os quais a falha funcional de um componente é a Falha Funcional do Grupo.

No escopo de implantação do PMEM foram identificados os trechos funcionais e os grupos de confiabilidade por meio de fluxogramas ou diagramas esquemáticos simplificados, mostrando os limites e a identificação dos principais componentes do trecho ou do grupo.

Para a elaboração dos trechos funcionais de Angra 2 [12] foram consultados os seguintes documentos da planta:

- a) Lista de funções monitoradas no escopo do PMEM;
- b) Descrição do sistema;

### **6.10 Orientações para a definição de trechos funcionais e grupos de confiabilidade para o SN-BR**

Da discussão acima para a identificação de trechos funcionais e grupos de confiabilidade, sugerem-se as seguintes orientações para o planejamento do MEM para o conjunto submarino nuclear + sistema de apoio:

- a) Identificar os trechos funcionais que farão parte do escopo de monitoramento do MEM durante as fases de concepção, desenvolvimento e produção, elaborando diagramas e esquemáticos;



- b) Identificar os grupos de confiabilidade que farão parte do escopo de monitoramento do MEM durante as fases de concepção, desenvolvimento e produção, elaborando diagramas e esquemáticos;
- c) Identificar as falhas funcionais dos trechos funcionais e dos grupos de confiabilidade que fazem parte do escopo de MEM.
- d) Incluir no banco de dados de apoio logístico o atributo logístico que permita identificar a qual grupo de confiabilidade ou trecho funcional pertence uma determinada ESC.
- e) Identificar as atividades de manutenção associadas aos trechos funcionais e grupos de confiabilidade.
- f) Identificar os trechos funcionais ou grupos de confiabilidade que possuem ESC significativas e não significativas para o risco;

A consideração das orientações acima dá origem aos seguintes produtos logísticos necessários para a realização do MEM relativo à determinação de ESC significativas para o risco:

- a) Lista de trechos funcionais e grupos de confiabilidade;
- b) Lista de trechos funcionais e grupos de confiabilidade a que um determinado ESC pertence;
- c) Banco de dados com a identificação dos trechos funcionais e grupos de confiabilidade associados às ESC no escopo de monitoramento;
- d) Lista de manutenções associadas a um determinado trecho funcional ou grupo de confiabilidade;
- e) Lista de trechos funcionais e grupos de confiabilidade a que pertence uma dada ESC significativa para o risco.

A Tabela 37 apresenta exemplos de atributos logísticos relacionais à trechos funcionais e à grupos de confiabilidade.

**Tabela 37:** Exemplos de atributos logísticos relacionados com trechos funcionais e grupos de confiabilidade

Atributos Logísticos	Descrição
Identificação do trecho funcional ou grupo de confiabilidade	Código que identifica de forma única um trecho funcional ou um grupo de confiabilidade no escopo MEM. Exemplo: <b>TF1:</b> Identifica o Trecho Funcional nº1. <b>GC3:</b> Identifica o Grupo de Confiabilidade nº3
Descrição do trecho funcional ou grupo de confiabilidade	Nome do trecho funcional ou grupo de confiabilidade no escopo de MEM. Exemplo: <b>Descr_TF:</b> Descrição de um trecho funcional ou <b>Descr_GC:</b> Descrição de um grupo de confiabilidade.
ESC pertencente a trecho funcional ou grupo de confiabilidade	Código que identifica se um ESC pertencente a um trecho funcional ou grupo de confiabilidade. Exemplo: <b>ESC_TF_GC:</b> identifica o trecho funcional ou grupo de confiabilidade que o ESC pertence.
Funções do trecho funcional ou do grupo de confiabilidade	Funções executadas pelo trecho funcional ou grupo de confiabilidade no escopo de MEM. Exemplo: <b>FUNCTION:</b> Remoção de calor residual.
Falha funcional do trecho funcional ou grupo de confiabilidade	Código que descreve o modo de falha relacionado a falha funcional de um trecho funcional ou grupo de confiabilidade. Exemplo: <b>MODFALHA:</b> vibração excessiva ou indisponibilidade.

### 6.11 Determinação dos critérios de desempenho de ESC no escopo do MEM

A NUMARC 93-01 [9] afirma que o critério de desempenho utilizado na avaliação de um ESC identifica a forma pela qual o desempenho deste ESC é medido. Este mesmo guia sugere a utilização dos seguintes critérios de desempenho para avaliação de ESC no escopo de monitoramento:

- a) Disponibilidade;
- b) Confiabilidade; e
- c) Condição.

Os critérios de desempenho podem assumir um único valor ou uma faixa de valores, podendo esses valores serem discretos ou contínuos. Por exemplo, pode-se assumir que a

disponibilidade global de um submarino nuclear deve ser maior ou igual a 90%, podendo assumir valores discretos de 0,1% na faixa entre 0% e 100%, e a confiabilidade dos sistemas de segurança nuclear deve ser superior a 95%, assumindo valores contínuos na faixa entre 0% e 100%.

Como exemplo da utilização da condição como critério de desempenho, pode-se citar que a condição do ESC “vareta combustível” pode assumir os seguintes valores discretos: “existência de trinca” ou “ausência de trinca”. A Tabela 38 apresenta esses e outros exemplos de critérios de desempenho.

**Tabela 38:** Exemplos de critérios de desempenho para ESC de um submarino nuclear

ESC	Critério de Desempenho	Valores	Tipo de valores
Submarino nuclear	Disponibilidade	$A \geq 90\%$ (variação de valores de 0,1%)	Discreto
Sistema de segurança	Confiabilidade	$R \geq 95\%$	Contínuo
Vareta de combustível	Condição (trinca)	“existência de trinca” ou “ausência de trinca”	Discreto
Casco resistente	Condição (corrosão)	“existência” ou “ausência”	Discreto
Trocador de calor (tubo)	Condição (incrustação)	$0 \leq \varepsilon \leq 5\text{mm}$	Contínuo

Caso os ESC no escopo de monitoramento não satisfaçam os critérios de desempenho, deve ser avaliada a necessidade do estabelecimento de “metas de desempenho”. O guia NUMARC 93-01 [9] ressalta que as metas de desempenho só devem ser definidas para aqueles ESC que não cumpriram os critérios de desempenho estabelecidos, tendo na definição das metas um modo de avaliação da capacidade de atingir valores de desempenho de forma satisfatória.

Com o objetivo de identificar a real causa do não atingimento de um critério de desempenho por um certo ESC (ou um conjunto deles), as metas de desempenho podem ser estabelecidas para diferentes componentes que compõe uma certa estrutura.

Para ilustrar o uso de metas de desempenho tratada acima, considere o seguinte exemplo. Seja um determinado trecho funcional, formado por dois equipamentos em série,

que tem como critério de desempenho uma confiabilidade de  $R_{\text{trecho}} \geq 92\%$ , e que apresentou no período monitorado uma confiabilidade de  $R_{\text{trecho}} = 90\%$ . Com o objetivo de investigar a real causa do baixo rendimento apresentado pelo conjunto, são estabelecidas as seguintes metas de desempenho: (1) confiabilidade  $R_{\text{trecho}} \geq 94\%$  para o trecho funcional; (2) confiabilidade de  $R_{\text{eqpto1}} \geq 96\%$  para o equipamento 1; e (3) confiabilidade de  $R_{\text{eqpto2}} \geq 98\%$  para o equipamento 2. A partir dos resultados obtidos com as metas ora estabelecidas pode ser identificado, por exemplo, que um dos equipamentos do trecho está com baixo rendimento, devendo, para tanto, ser estabelecidas novas ações corretivas.

O guia [9] destaca ainda que devem ser definidos critérios de desempenho específicos para os ESC que ficam em estado de prontidão (ou em *standby*<sup>54</sup>) tanto os significativos para o risco quanto os não significativos para o risco. Estes sistemas só podem comprometer o desempenho global da planta se quando demandados não forem capazes de realizar suas funções pretendidas. Um outro modo de identificar a falha desses sistemas é durante a realização de testes ou inspeções.

Como os transientes que podem demandar a operação desses sistemas geralmente são pouco frequentes, o critério de desempenho global da planta (ou critério de desempenho no “nível da planta”) não é um bom indicador ou medida de desempenho para os ESC que ficam em *standby*. Para esse tipo de ESC o guia NUMARC 93-01[9] propõe o seguinte critério de desempenho qualitativo: “ao iniciar sob demanda, realiza sua função de projeto”. A confiabilidade do cumprimento deste critério de desempenho (valor quantitativo) pode ser definida utilizando métodos probabilísticos.

Os sistemas em *standby* geralmente são encontrados em uma configuração em paralelo com um sistema semelhante, sendo denominado configuração em paralelo passivo. A configuração em paralelo que os sistemas operam ao mesmo tempo, é denominada de paralelo ativo.

A NUMARC 93-01[9] orienta que sejam estabelecidos critérios de desempenho “em nível da planta” para os ESC não significativos para o risco que operam normalmente<sup>55</sup>. Destaca ainda que para alguns desses sistemas (ESC não significativos para o risco que

---

<sup>54</sup> São sistemas que devem estar prontos para operar caso seja demandado. (nota do autor)

<sup>55</sup> Entende-se que um sistema opera normalmente, quando ele não opera normalmente em *standby*. (nota do autor)

operam normalmente) não é possível serem monitorados totalmente pelo critério “em nível da planta”, sendo necessário o estabelecimento de critérios de desempenho específicos, como por exemplo, “número de falhas de função de segurança decorrente de causa relacionada com a manutenção”.

A Tabela 39 resume os possíveis critérios de desempenho propostos pela NUMARC 93-01[9] para os ESC no escopo de monitoramento.

A NUMARC 93-01 [9] orienta que os critérios de desempenho no nível da planta devem incluir os seguintes:

- a) Número de desligamentos não planejados para cada 7000 horas de funcionamento.
- b) Número de atuações não planejadas de sistemas de segurança.
- c) Fator de perda de capacidade não planejada.

**Tabela 39:** Critérios de desempenho para ESC no escopo de monitoramento

**Fonte:** NUCLEAR ENERGY INSTITUTE [9]

Classificação do ESC		Critério de desempenho	Nível de monitoramento
Em relação ao risco	Tipo de operação		
Significativo	Normal	Disponibilidade, confiabilidade ou condição	Trecho funcional ou grupo de confiabilidade
	Standby	Específico Ex.: “falha funcional”	Trecho funcional ou grupo de confiabilidade
Não significativo	Normal	Desempenho observado no nível da planta Ex.: desligamentos do reator ou atuação de sistemas de segurança.	“nível da planta”
		Específico Ex.: “número de falhas causada por manutenção”	Trecho funcional ou grupo de confiabilidade
	Standby	Específico Ex.: “resultado de testes”	Trecho funcional ou grupo de confiabilidade

## **Lições aprendidas da implantação do MEM em outras usinas**

Em Angra 2 [12] são usados os seguintes critérios de desempenho:

- a) ESC ativos significativos para o risco: indisponibilidade e falha funcional (trecho funcional e grupo de confiabilidade).
- b) ESC ativos não significativos para o risco: (1) falha funcional (trecho funcional e grupo de confiabilidade); e (2) falhas de ESC (nível de planta) que provocam desligamento, perda de capacidade, reduções de carga não programadas superiores a 10% ou atuação de sistemas de segurança.
- c) ESC passivos: indisponibilidade e falha funcional (resultados de testes de trecho funcionais).
- d) ESC de preservação de estruturas: avaliação de resultados de testes periódicos.
- e) ESC metálicos ou de concreto com classe sísmica 1: avaliação da condição.

### **6.12 Orientações para a definição de critérios de desempenho para o SN-BR**

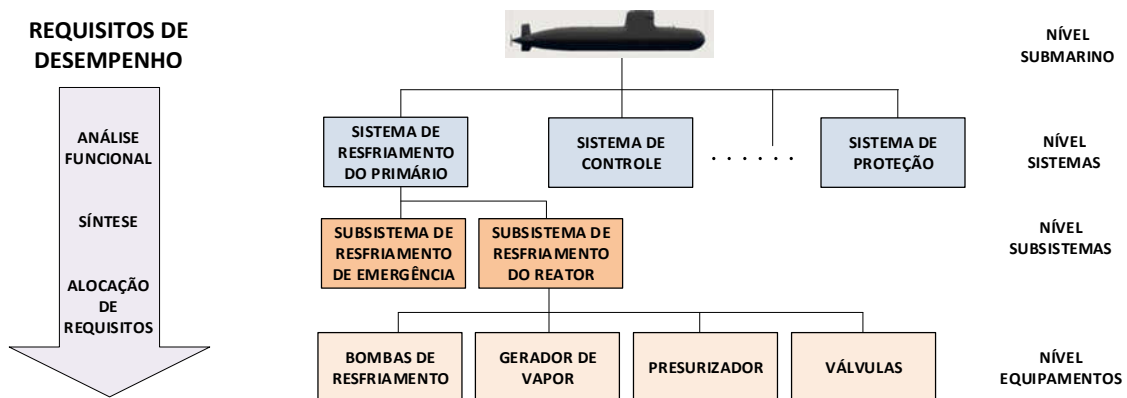
Os critérios de desempenho de ESC pertencentes ao escopo de monitoramento são fundamentais para uma avaliação se eles estão operando conforme projetado.

Na abordagem de engenharia de sistemas, os critérios de desempenho fazem parte dos requisitos de sistema, gerados na fase de concepção a partir da análise do conceito operacional. A medida que a arquitetura vai sendo elaborada desde o mais alto nível (o próprio sistema) até os níveis subsequentes, os critérios de desempenho vão sendo detalhados e alocados, primeiramente caracterizando as funções (conforme discussão anterior), e posteriormente caracterizando as estruturas, sistemas, equipamentos e componentes. Tal fato é representado na Figura 58.

Blanchard [18] chama os critérios de desempenho de medidas técnicas de desempenho. São exemplos de medidas técnicas de desempenho:

- a) Disponibilidade;
- b) Confiabilidade;
- c) Velocidade;
- d) Rotação;
- e) Vazão;
- f) Tensão elétrica;

- g) Corrente elétrica;
- h) Tempo médio entre falhas;
- i) Taxa de falhas;
- j) Corrosão;
- k) Deformação;
- l) Incrustação;
- m) Vibração;
- n) Ruído;
- o) Espessura.



**Figura 58:** Ilustração da alocação de requisitos de desempenho na síntese de ESC do SN-BR.

As medidas de desempenho técnico também são definidas para o sistema de apoio logístico. Blanchard [32] cita algumas dessas medidas:

- a) Tempo médio de manutenção corretiva;
- b) Tempo médio de manutenção preventiva;
- c) Tempo de atraso logístico;
- d) Tempo de atraso administrativo;
- e) Tempo médio entre reparos;
- f) Tempo médio de substituição de item;
- g) Razão entre o custo de manutenção e o custo total do ciclo de vida;
- h) Carga de trabalho por oficina de manutenção;
- i) Tempo médio de resposta logístico.

As medidas de desempenho técnico também podem ser definidas para medir o desempenho do processo que avalia a eficácia da manutenção. São exemplos dessas medidas:

- a) Quantidade média de ESC no escopo de monitoramento;
- b) Quantidade média de ESC identificados com desempenho insatisfatório;
- c) Tempo médio para identificar ESC com desempenho insatisfatório;
- d) Quantidade média de ações corretivas necessárias para reestabelecer a uma condição satisfatória um ESC com desempenho insatisfatório.
- e) Tempo médio para identificar a causa raiz de falhas funcionais de ESC com desempenho insatisfatório.

Uma outra informação muito importante relacionada ao critério de desempenho, é a definição dos valores esperados que este critério de desempenho pode assumir. Esse tipo de informação é extremamente importante para o operador conduzir de forma segura o sistema.

Devido a criticidade de alguns ESC (por exemplo, sua importância para a segurança), é fundamental que se defina meios e indicadores que tornem possível tanto para o operador quanto para o pessoal da manutenção a identificação do real estado do sistema.

Face ao exposto acima, sugerem-se as seguintes orientações:

- a) Verificar se os critérios de desempenho foram identificados e claramente definidos dentro dos requisitos do submarino e do seu sistema de apoio.
- b) Verificar se houve desdobramento dos critérios de desempenho e sua consequente alocação para os elementos da arquitetura do conjunto submarino nuclear e seu sistema de apoio.

### **6.13 Avaliação periódica do MEM para o submarino nuclear**

A discussão apresentada no Capítulo 5 sobre o perfil de utilização do submarino aponta que é preciso haver uma harmonização do requisito (a)(3) da RM, onde exige-se que uma avaliação periódica do MEM e das atividades de manutenção sejam realizadas pelo menos uma vez a cada recarga de combustível, não devendo exceder 24 meses.



Os projetistas de ALI deverão levar em consideração esta restrição na elaboração dos períodos que farão parte do perfil de utilização do submarino nuclear, e sobretudo, do seu sistema de apoio.

Cabe ressaltar que o perfil de utilização do sistema de apoio do submarino nuclear não pode ser negligenciado, sob pena de inviabilizar a realização de avaliação do MEM em um dado momento devido, por exemplo, à indisponibilidade de um dique (ou cais) decorrente da utilização deste por outra embarcação ou devido à intervenção para manutenção periódica das suas próprias infraestruturas.

A compatibilidade dos perfis de utilização do submarino e do seu sistema de apoio se torna cada vez mais necessário à medida em que estes sistemas possuam tempos de vida útil distintos, e demandem necessidades de manutenção em períodos diferentes. Corrobora com esta afirmação quando o sistema de apoio ao submarino é também sistema de apoio de outros sistemas, com características semelhantes ou não.

#### **6.14 Gestão das atividades de manutenções que impactam a segurança nuclear**

As atividades de MEM demandam um forte planejamento das atividades de manutenção que possam afetar as características de segurança definidas na base de projeto. Os projetistas de ALI devem levar tal fato em consideração no plano de manutenção do submarino apontando de forma precisa a sua configuração operacional antes, durante e após as intervenções de manutenção, apontando de forma clara e precisa as medidas de gestão para o incremento de risco.

Sugere-se que o perfil operacional para o conjunto submarino e sistema de apoio definido nas fases de design sejam estabelecidos de forma a minimizar as condições de risco não aceitáveis decorrente das intervenções de manutenção planejadas ou não planejadas. Sugere-se que seja utilizada a matriz de impacto no risco mostrada na Figura 48 para minimizar situações indesejáveis desse tipo, otimizando por exemplo o arranjo das ESC dentro do submarino.

## Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações

O advento de um submarino de propulsão nuclear traz uma série de benefícios e desafios para o país e para a Força Armada que o detém. Entre os benefícios, encontram-se o grande poder de dissuasão, a capacidade de patrulhamento de grandes áreas costeiras, o arrasto tecnológico devido ao contato com novas tecnologias, e a transferência de conhecimento em áreas específicas, tais como: apoio logístico integrado, engenharia de sistemas, construção, segurança nuclear, etc.

Mas todos esses benefícios estão associados com a superação de grandes desafios inerentes à especificidade de um sistema de alta complexidade, tais como: muitas horas de trabalho empregada; utilização de mão de obra altamente especializada; gerenciamento de uma quantidade considerável de requisitos e interfaces; muitas partes interessadas no desenvolvimento do sistema; emprego de técnicas estruturadas e sistemática de desenvolvimento de sistemas.

Ainda no grupo de desafios associado ao advento de um submarino nuclear no Brasil, tem-se a necessidade da sustentabilidade da disponibilidade, e, sobretudo, associada a uma alta confiabilidade. Confiabilidade esta que garante a segurança do público em geral, do meio ambiente e do próprio sistema.

Em busca dessa alta confiabilidade e disponibilidade dos sistemas relacionados com a segurança, é indispensável o desenvolvimento de técnicas, métodos e abordagens que permitam o planejamento, a implantação, a execução, a medição e a melhoria do monitoramento da eficácia da manutenção por meio de uma visão sistêmica do ciclo de vida do submarino e do seu sistema de apoio.

Visando o monitoramento da eficácia da manutenção do SN-BR, foram apresentados e discutidos nesse trabalho: os principais requisitos que determinam o MEM; uma visão sistêmica das principais características do ciclo de vida de sistemas complexos; a metodologia de apoio logístico integrado utilizada para construir a suportabilidade de sistemas; as principais características intrínsecas de um submarino nuclear de ataque que influenciam o MEM; e, por fim, orientações para a realização de atividades de planejamento do MEM durante as fases de projeto de um submarino nuclear.

Assim como a complexidade do sistema aqui estudado, o MEM de usinas nucleares embarcadas na plataforma de um submarino também apresenta uma enorme complexidade

e extensão, não devendo, nem por um momento, ser considerado este trabalho uma finalização do assunto.

Como sugestão de novos trabalhos relacionados ao tema, sugere-se a realização de estudos relacionados à regulação (leis e normas) e à fiscalização do MEM para o conjunto submarino nuclear e seu sistema de apoio.

## Referências Bibliográficas

- [1] PROSUB. **Submarino com Propulsão Nuclear – Projeto e Construção**. Disponível em <<https://www.marinha.mil.br/prosub/projeto-e-construcao>>. Acesso em 02 fev. 2018.
- [2] PODER NAVAL. **PAEMB – Plano de Articulação e Equipamento da Marinha do Brasil**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2011/01/20/paemb-plano-de-articulacao-e-equipamento-da-marinha-do-brasil/>>. Pub. em: 20 jan. 2011. Acesso em 15 abr. 2018.
- [3] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN 1.21-Manutenção de Usinas Nucleoelétricas**. Rio de Janeiro. 1991.
- [4] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN 1.26-Segurança na Operação de Usinas Nucleoelétricas**. Rio de Janeiro. 1997.
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC/IEEE 15288:2015: Systems and software engineering - System life cycle processes**. Genebra, Suíça: 2015.
- [6] DIRETRIZES. **Site significados**. Disponível em <<https://www.significados.com.br/diretrizes/>>. Acesso em: 03 jan. 2017.
- [7] DIRETRIZES. **Dicionário Aurélio de Português Online**. Disponível em <[www.dicionariodoaurelio.com/diretrizes/](http://www.dicionariodoaurelio.com/diretrizes/)>. Acesso em: 02 jan. 2018.
- [8] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **10 CFR 50.65 “Requirements for Monitoring the effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plant”**. Washington, D.C. NRC. 1991.
- [9] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE (NEI). **NUMARC 93-01 REV 4E: Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants**. 2015.
- [10] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **NUREG-1526: Lessons Learned from Early Implementation of The Maintenance Rule at Nine Nuclear Power Plants**. Washington, D.C. NRC. 1995.
- [11] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **NUREG-1548: Lessons Learned from Maintenance Rule Baseline Inspections**. Washington, D.C. NRC. 1999.

- [12] ELETRONUCLEAR. **Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção – Sistemática. 2PA-MG 25.** Volume I, rev. 05, DEZ 2016.
- [13] HIRSCHFELD, G. M. R. **Transferência de Tecnologia e Nacionalização no PROSUB - Benefícios para o Brasil.** Brasília, DF. 2014. Disponível em <<http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/>>. Acesso em 11 fev. 2016.
- [14] PASCAL, C., BLANCHET, C., OLLIVIER, J. **The value of modern decision-making support services to fusion projects.** Fusion Engineering and Design 82 (2007) 2713–2721.
- [15] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Regulatory Guide 1.160: Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plant.** Washington, D.C., revision 3, 2012.
- [16] U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Inspection Procedure 62706: Maintenance Rule.** Washington, D.C., 2000.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9000:2005: Sistemas de Gestão de Qualidade – Fundamentos e vocabulário.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [18] BLANCHARD, B. S. **Systems Engineering and Analysis.** 4th. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006. 804p.
- [19] ABREU, H. F. **Apoio Logístico Integrado: Peculiaridades da Indústria de Defesa e Tecnologia.** Revista Brasileira de Estratégia e Defesa v.2, nº1, 2015, p.53-72
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO IEC 15288:2008: Engenharia de Sistemas e Software – Processos de Ciclo de Vida de Sistemas.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [21] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING. **Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities.** Wiley. 4th. edition. 2015.
- [22] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION. **AAP-20: NATO Life Cycle Model.** Edition C, version 1. 2015.

- [23] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Systems Engineering Handbook**. Washington, D.C. NASA, 2007.
- [24] AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. **Biologia das Células 1**. 4ª edição. São Paulo: Editora Moderna, 2015.
- [25] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC 24748-1:2010: Systems and software engineering – Life Cycle Management – Part 1: Guide for life cycle management**. Genebra, Suíça: 2010.
- [26] PEREIRA, AMÉRICO DINIS REBELO DA CUNHA. **Sistemática do Planejamento Estratégico Militar baseado em Capacidades: uma necessidade para o Ministério da Defesa**. Rio de Janeiro: ESG, 2016.
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC 29148:2011: Systems and software engineering - Life cycle processes – Requirements engineering**. Genebra, Suíça: 2011.
- [28] PADILHA, L. **NUCLEP entrega vaso de pressão do reator do LABGENE**. Disponível em <<http://www.defesaaereanaval.com.br/nuclep-entrega-vaso-de-pressao-do-reator-do-labgene/>>. Pub. em 16 Jul. 2014. Acesso em: 17 Jan. 2018.
- [29] WILTGEN, G. **Submarino nuclear: CTMSP avança na montagem eletromecânica do LABGENE**. Disponível em <<http://www.defesaaereanaval.com.br/submarino-nuclear-ctmsp-avanca-na-montagem-eletromecanica-do-labgene/>>. Pub. em 27 Abr. 2017. Acesso em: 17 jan. 2018.
- [30] PODER NAVAL. **PROSUB comissiona Shiplift**. Disponível em: <<http://www.naval.com.br/blog/2017/12/21/prosub-comissiona-shiplift/>>. Pub. em: 21 dez. 2017. Acesso em: 17 jan. 2018.
- [31] PODER NAVAL. **Base de submarinos da Marinha reduz ritmo de trabalho por corte de gastos**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2016/01/12/base-de-submarinos-da-marinha-reduz-ritmo-de-trabalho-por-corte-de-gastos/>>. Pub. em: 12 Jan. 2016. Acesso em: 17 jan. 2018.

- [32] BLANCHARD, B. S. **Logistic Engineering and Management**. 6th. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004. 546p.
- [33] FARIA, A. R. de. **A SEGUNDA ESQUADRA BRASILEIRA: uma abordagem de planejamento e gestão, sob a ótica do Apoio Logístico Integrado**. CPEM, Escola de Guerra Naval. EGN. Rio de Janeiro. 2012.
- [34] DOD – DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-1388-1: Logistics Support Analysis**. Washington, D. C., 1973.
- [35] DOD – DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-502: Department of Defense Handbook – Acquisition Logistics**. Washington, D. C., 1997.
- [36] DOD – DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-502A: Department of Defense Handbook – Product Support Analysis**. Washington, D. C., 2013.
- [37] CANDEIAS S., Luiz Fernando S. **Gerenciamento de Custos de Projetos na Marinha do Brasil**. CEMOS, Escola de Guerra Naval, EGN, Rio de Janeiro. 2014.
- [38] CÔRTEZ, A. L. A., BRICK, E. S. **Sistema de Informação para Apoio ao Processo de Engenharia de Sistemas Técnicos**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Fortaleza, CE, 2007.
- [39] CYRUS B. Meher-homji; FRAM S. Poland. **The Application of Integrated Logistic Support Concepts in Energy Project Planning**. Boyce Engineering International, INC. Houston, Texas. 1983. p 267-275.
- [40] INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING. **What is Systems Engineering**. Disponível em <<https://www.incose.org/AboutSE/WhatIsSE>>. Acesso em: 23 jan. 2018.
- [41] DOD – DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-1388-1A: Logistics Support Analysis**. Washington, D. C., 1983.
- [42] PODER NAVAL. **BNRJ realiza sua 1ª docagem de submarino classe “Tupi”**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2009/03/19/bnrj-realiza-sua>>

- 1%C2%AA-docagem-de-submarino-classe-%E2%80%9Ctupi%E2%80%9D/>. Pub. em: 19 mar. 2009. Acesso em: 04 fev. 2018.
- [43] NAVAL TECHNOLOGY. **SSK S-80 Class Submarine**. Disponível em: <<http://www.naval-technology.com/projects/ssk-s-80-class-submarine/attachment/ssk-s-80-class-submarine4/>>. Acesso em: 04 fev. 2018.
- [44] DAU - DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY. **Integrated Product Support Element Guidebook**. 2011.
- [45] JONES, J. V. **Integrated Logistics Support Handbook**. 3<sup>rd</sup> ed. Mexico: McGraw-Hill Companies Inc, 2006.
- [46] AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE - ASD. **ASD STAN S3000L - Logistic Support Analysis**. Bruxelas, 2010. Disponível em: <<http://www.asdstan.org/s3000L.html>>. Acesso em 19 fev. 2018.
- [47] MILKOFKY, B. **David Bushnell and his Revolutionary Submarine**. Disponível em <<https://connecticuthistory.org/david-bushnell-and-his-revolutionary-submarine/>>. Acesso em: 14 ago. 2017.
- [48] BRASIL. Marinha do Brasil. **100 anos da Força de Submarinos do Brasil / FGV Projetos**. Rio de Janeiro. FGV Projetos, 2014.
- [49] WILTGEN, G. Pode Naval. **‘Tikuna’, o caçador de porta-aviões**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2010/04/02/tikuna-o-cacador-de-porta-avioes/>>. Pub. em: 2 abr. 2010. Acesso em: 19 fev. 2018.
- [50] PODER NAVAL. **100 anos de submarinos alemães – parte 3**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2008/12/15/100-anos-de-submarinos-alemaes-parte-3/>>. Pub. em: 15 dez. 2008. Acesso em: 19 fev. 2018.
- [51] N.R.P. Defencyclopedia. Explained: How Air Independent Propulsion (AIP) Works! Disponível em <<https://defencyclopedia.com/2016/07/06/explained-how-air-independent-propulsion-aip-works/>>. Pub. em: 6 jul. 2016. Acesso em: 19 fev. 2018.



- [52] GUIMARÃES, L. S. Síntese de Doutrina de Segurança para Projetos e Operação de Submarinos Nucleares. 1999. 645 f. Tese (Doutorado em Engenharia Naval) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.
- [53] BRASIL. Marinha do Brasil. **Submarinos – Defesa e Desenvolvimento para o Brasil**. Rio de Janeiro. Versal Editores, 2014. Disponível em <<https://www.marinha.mil.br/prosub>>. Acesso em: 14 ago. 2017.
- [54] PODER NAVAL. **O PROSUB e o submarino nuclear brasileiro SN-BR**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2018/02/20/o-prosub-e-o-submarino-nuclear-brasileiro-sn-br/>>. Pub. em: 20 fev. 2018. Acesso em 21 fev. 2018.
- [55] PODER NAVAL. **Criação da Agência Naval de Segurança Nuclear e Qualidade**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2018/02/10/criacao-da-agencia-naval-de-seguranca-nuclear-e-qualidade/>>. Pub. em: 10 fev. 2018. Acesso em: 24 fev. 2018.
- [56] BRASIL. Diário Oficial da União. **PORTARIA Nº 120/MB, DE 20 DE ABRIL DE 2017**. Disponível em <<http://www.impresanacional.gov.br/>>. Pub. em: 24 abr. 2017. Acesso em: 24 fev. 2018.
- [57] MELO, P. F. F. F., OLIVEIRA, I. M. S., SALDANHA, P. L. (2011). **LWR Safety Analysis and Licensing and Implications for Advanced Reactors, Nuclear Power - Operation, Safety and Environment, Dr. Pavel Tsvetkov (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/16901**. Disponível em <<https://www.intechopen.com/books/nuclear-power-operation-safety-and-environment/lwr-safety-analysis-and-licensing-and-implications-for-advanced-reactors>>. Acesso em 24 fev. 2018.
- [58] MELO, Paulo Fernando F. F. Aula de Mestrado. COPPE/UFRJ. **Notas de aula: Funções Críticas de Segurança**. Ministrada em: 2013. Rio de Janeiro. UFRJ.
- [59] GOOGLE. **HMS Ocelot – Google Maps**. Disponível em <<https://www.google.co.uk/maps/place/HMS+Ocelot/>>. Acesso em 24 fev. 2018.
- [60] PODER NAVAL. **Submarino nuclear brasileiro: a palavra do Comandante da MB**. Disponível em <<http://www.naval.com.br/blog/2009/04/10/submarino-nuclear->

brasileiro-a-palavra-do-comandante-da-mb/>. Pub. em: 10 abr. 2009. Acesso em 24 fev. 2018.

- [61] ELETRONUCLEAR. **Resultado da Seleção de ESC's no Escopo do PMEM. 2PA-MG 28.** Volume I, rev. 00, JAN 2017.
- [62] ELETRONUCLEAR. **Resultado da Determinação da Significação para o Risco. 2PA-MG 29.** Volume I, rev. 00, SET 2016.
- [63] ELETRONUCLEAR. **Bases Técnicas do PMEM. 2PA-MG 30.** Volume I, rev. 01, FEV 2017.
- [64] VAJGEL, S. **Abordagem Regulatória do Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção para Usinas Nucleoelétricas. 2009. 99p.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – CNEN/IEN, Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- [65] TALARICO, M. A. **Considerações sobre a Aplicação da Tomada de Decisão com Informação do Risco ao Processo de Licenciamento de Instalações Industriais Especiais.** 2015. 412p. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2015.
- [66] MELO, Paulo Fernando F. F. Aula de Mestrado. COPPE/UFRJ. **Notas de aula: Curso de Análise de Segurança de Centrais Nucleares – Parte 1: Análise Probabilística de Segurança.** Ministrada em: 2013. Rio de Janeiro. UFRJ.
- [67] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. NRC. NUREG/CR-5424, "Eliciting and Analyzing Expert Judgment: A Practical Guide". 1990.
- [68] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. NRC. NUREG/CR-5424, " Method for the Elicitation and use of Expert Opinion in Risk Assessment". 1987.

## **Apêndice A – Tópicos para o Conceito Operacional (OpsCon)**

1. Escopo;
  - 1.1. Aplicação do documento;
  - 1.2. Visão geral do documento;
  - 1.3. Visão geral do sistema;
2. Documentos de referência;
3. Sistema/situação atual;
  - 3.1. Cenário, objetivos e escopo;
  - 3.2. Restrições e políticas operacionais
  - 3.3. Descrição do sistema/situação atual;
  - 3.4. Modos de operação para o sistema/situação atual.
  - 3.5. Classe de usuários e outros pessoais envolvidos
    - 3.5.1. Estrutura organizacional;
    - 3.5.2. Perfil de classes de usuários;
    - 3.5.3. Interação entre as classes de usuários;
    - 3.5.4. Outros pessoais envolvidos;
  - 3.6. Ambiente operacional;
4. Justificativa e natureza das mudanças;
  - 4.1. Justificativa para mudanças
  - 4.2. Descrição das mudanças desejadas;
  - 4.3. Prioridades entre as mudanças;
  - 4.4. Mudanças consideradas, mas não incluídas;
  - 4.5. Considerações e restrições;
5. Conceitos para o sistema proposto;
  - 5.1. Cenário, objetivos e escopo;
  - 5.2. Políticas e restrições operacionais;
  - 5.3. Descrição do sistema proposto;
  - 5.4. Modos de operação
  - 5.5. Classe de usuários e outros pessoais envolvidos;
    - 5.5.1. Estrutura Organizacional
    - 5.5.2. Perfil de classe de usuários;
    - 5.5.3. Interação entre as classes de usuários;
    - 5.5.4. Outros pessoais envolvidos
  - 5.6. Ambiente de Apoio
6. Cenários Operacionais
  - 6.1. Sumário de Impactos
  - 6.2. Impactos operacionais
  - 6.3. Impactos organizacionais
  - 6.4. Impactos durante o desenvolvimento
7. Análise do sistema proposto
  - 7.1. Benefícios

- 7.2. Desvantagens e limitações
- 7.3. Alternativas consideradas
- 8. Apêndices
- 9. Glossário

## Apêndice B – Elementos Logísticos e seus objetivos

**Tabela 40:** Objetivo e principais produtos logísticos relacionados aos elementos Apoio Integrado ao Produto<sup>56</sup> (elementos logísticos). **Fonte:** Universidade de Aquisição de Defesa [44]

Elemento Logístico	Objetivo	Produtos Logísticos
1. Gestão de Apoio ao Produto	Planejar e gerir custos e desempenho ao longo da cadeia de valor de apoio ao produto, desde a fase de projeto até o seu descarte.	1.Plano de Apoio Logístico; 2.Relatório de custo e desempenho; 3.Relatório de Custos de Manuais Técnicos.
2. Interface de Projeto	Participar do processo de engenharia de sistemas para influenciar o projeto desde a sua pré-concepção e ao longo do seu ciclo de vida, facilitando sua suportabilidade a fim de maximizar a disponibilidade, eficácia e capacidade do sistema a um custo total de posse adequado.	1.Diagramas de bloco de confiabilidade; 2.Relatório de Análise de perigos e de segurança; 3.Especificação do sistema; 4.Dados de análises de MCC. 5.Predições de confiabilidade e manutenibilidade.
3. Engenharia de Suportabilidade	Empreender ações para executar o apoio logístico aos sistemas durante a fase de utilização nos diversos ambientes operacionais	1.Propostas de alteração de projeto; 2.Coleta de dados de manutenção; 3.Relatório FRACAS; 4.Relatório de Obsolescência; 5.Plano de controle de corrosão.
4. Apoio de Abastecimento	Identificar, planejar e implantar ações de gerenciamento tornando disponíveis peças e sobressalentes para apoiar, quando necessário, o mantenedor a um custo total de posse mais baixo possível.	1.Lista de fornecimento de peças; 2.Dados para fornecimento de peças; (fabricante, número de referência)
5. Gestão e Planejamento da Manutenção	Identificar, planejar e implantar o conceito e requisitos de manutenção, de modo a garantir que o equipamento/capacidade estará disponível quando necessário, a um custo total de posse mais baixo possível.	1.Relatório de análise de nível de reparo; 2.Plano de Manutenção; 3.Relatório de Treinamento para Atividades de Manutenção; 4.Lista de itens com funções críticas; 5.Análise de modos de falhas e efeitos; 6.Análise de falha funcional.

<sup>56</sup> *Apoio Integrado ao Produto* é a nova denominação proposta pela Universidade de Aquisição de Defesa, no seu Guia de Apoio Integrado ao Produto (42), para referir-se aos elementos de apoio logísticos.

6. PHS&T	Identificar, planejar e adquirir requisitos de PHS&T para maximizar a disponibilidade e o uso do material sempre que forem necessários para treinamento ou missão.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Relatório de dados de transporte;</li> <li>2. Relatório de custos e testes de empacotamento;</li> <li>3. Instruções especiais de empacotamento.</li> </ol>
7. Dados Técnicos	Identificar, planejar e implantar ações de gestão para desenvolver e obter informação para: Instalar, operar, manter, e treinar a fim de maximizar a disponibilidade/eficiência do equipamento; catalogar/obter de modo eficaz peças/sobressalentes, equipamentos de suporte e itens de abastecimento; definir a base de configuração do sistema (hardware e software) para eficazmente apoiar o utilizador com a melhor capacidade no momento que for solicitado.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pacote de dados técnicos;</li> <li>2. Lista de usuários de dados técnicos;</li> <li>3. Lista com esquemas e modelos do produto;</li> <li>4. Lista de Manuais técnicos;</li> <li>5. Relatório indexado de esquemas.</li> <li>6. Lista de esquemas e modelos de desenvolvimento do produto.</li> </ol>
8. Equipamento de Apoio	Identificar, planejar e implantar ações para adquirir equipamentos de apoio (móveis ou fixos) necessários para manter a operação e manutenção do sistema e garantir sua disponibilidade quando necessário, a um custo de posse total baixo.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lista de equipamentos de testes e ferramentas especiais;</li> <li>2. Dados de instalação de equipamentos de apoio;</li> <li>3. Lista de requisitos e testes de manutenção de equipamentos de teste.</li> </ol>
9. Treinamento e Apoio de Treinamento	Planejar e implantar estratégia integrada e coesa para treinar pessoal civil e militar para maximizar a eficácia de doutrina, pessoal e carga de trabalho para operar e manter o equipamento ao longo do ciclo de vida.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Material de treinamento;</li> <li>2. Lista de facilidades de treinamento;</li> <li>3. Relatório de atividades de treinamento de manutenção;</li> <li>4. Documentação de apoio aos sistemas de treinamento;</li> <li>5. Requisitos de Mídia instrucional.</li> </ol>
10. Pessoal e carga de trabalho.	Identificar, planejar e captar pessoal, civil e militar, com habilidade e competência necessária para: (a) operar equipamento; (b) apoiar de modo eficaz o utilizador e garantir a disponibilidade da capacidade quando necessário.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lista de cargos e funções;</li> <li>2. Lista de habilidades e competências por funções.</li> <li>3. Lista de habilidades e competências críticas e principais.</li> <li>4. Relatório de carga de trabalho para atividades de manutenção.</li> </ol>
11. Facilidades e Infraestrutura	Identificar, planejar e adquirir facilidades para treinamento, manutenção e armazenagem de modo a maximizar a eficácia de operação do	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Plano de facilidades;</li> <li>2. Relatório de facilidades de treinamentos;</li> <li>3. Relatório de manutenção de facilidades;</li> </ol>

	sistema e do sistema de apoio logístico a um custo total de posse baixo.	
12. Recursos computacionais	Identificar, planejar e adquirir facilidades, hardware, software, documentação, mão de obra e pessoal necessário para o planejamento e gestão da capacidade pretendida de sistemas (software e hardware).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Documentação de programas computacionais;</li> <li>2. Plano de instalação de software;</li> <li>3. Manual de usuário de softwares;</li> <li>4. Relatório de teste de interferência eletromagnética.</li> <li>5. Frequência de alocação de dados.</li> </ol>