VINÍCIUS NOVICKI OBADOWSKI

**MODELAGEM E ANÁLISE DE
SISTEMAS DE PROPULSÃO
NAVAL – ABORDAGEM BASEADA
EM SISTEMAS HÍBRIDOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

**SÃO PAULO
2020**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Obadowski, Vinícius Novicki

MODELAGEM E ANÁLISE DE SISTEMAS DE PROPULSÃO NAVAL –
ABORDAGEM BASEADA EM SISTEMAS HÍBRIDOS / V. N. Obadowski --
versão corr. -- São Paulo, 2020.
132 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Sistemas híbridos 2.Redes de Petri 3.Submarinos I.Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos II.t.

VINÍCIUS NOVICKI OBADOWSKI

**MODELAGEM E ANÁLISE DE
SISTEMAS DE PROPULSÃO
NAVAL – ABORDAGEM BASEADA
EM SISTEMAS HÍBRIDOS**

VERSÃO CORRIGIDA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Programa: Engenharia Mecânica

Área de Concentração:

Engenharia de Controle e Automação
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

**SÃO PAULO
2020**

Agradecimentos

Aos meus familiares cujos apoios foram fundamentais na continuidade deste trabalho, bem como no confronto aos desafios encontrados.

Ao Prof. Dr. Paulo Miyagi por sua constante paciência, dedicação e atenção. Agradeço pelas experiências, comentários e ideias que além de estarem presentes neste trabalho, também servem como fonte de inspiração para outros projetos.

À Fernanda, minha esposa, que comigo perseverou ao longo desta jornada, incentivando, acreditando e principalmente apoiando este trabalho.

Resumo

O projeto de submarinos convencionais demanda uma ampla variedade de conhecimentos nas minhas diversas áreas da engenharia, como elétrica, mecânica, naval, além de subáreas específicas como termodinâmica, hidrodinâmica, hidrostática, engenharia estrutural, distribuição de energia elétrica, processos químico-físicos. O que acaba por caracterizar o projeto de submarinos como sendo um de um sistema complexo, pois não só consiste de várias áreas do conhecimento, como também profissionais com diferentes experiências. Na área de projetos navais, há um esforço por se desenvolver softwares, técnicas e formalismos que auxiliem na resolução dos desafios da área, visto que com o crescimento das tecnologias miniaturizadas, computação da nuvem e introdução dos conceitos da Indústria 4.0, há espaço para novas abordagens. Em outros ramos industriais, existem formalismos para os chamados sistemas complexos, como as Redes de Petri Predicado Transição Diferencial Orientadas a Objetos (PTD-OO), as quais permitem que sistemas de diferentes naturezas sejam tratados conjuntamente. Na área naval, este tipo de modelagem se traduz em oportunidades de inovação nas áreas de projetos preliminares e avaliação de requisitos durante as primeiras fases de um projeto. Ao longo deste trabalho, são apresentados conceitos atinentes às redes de Petri, ao projeto naval e o desenvolvimento de um modelo em Redes de Petri PTD-OO dos sistemas de propulsão e de eletricidade de um submarino convencional com a finalidade de avaliar a adequabilidade deste formalismo para este sistema.

Palavras-chaves: Rede de Petri, Rede Predicado Transição Diferencial, submarino convencional, sistema de propulsão, Projeto Preliminar.

Abstract

The project of conventional submarines requires a wide range of knowledge over several engineering fields, like as electrical, mechanical, naval, besides specific subareas as thermodynamics, hydrodynamics, hydrostatics, structural engineering, power distribution and physical-chemical processes. Which makes the submarine project to be considered as a complex system, not only due to requirements of several fields, but also the need of professionals with different experiences. In naval project area, there is an effort to develop software, techniques and formalisms that address the challenges in the field, as long as with the growth of miniaturized technologies, cloud computing and introduction of Industry 4.0 concepts, there are space for new approaches. In other industrial fields, there are formalisms to deal with the called complex systems, like Object-Oriented Transition Differential Predicate (OO-DPT) Petri Nets, which allow that system with different natures be designed together. In naval area, this kind of modelling brings up innovation opportunities in preliminary studies and requirement evaluation at early stage design. In this work, it is presented concepts regarding Petri nets, naval projects and development of a model in OO-DPT Petri nets for propulsion and electrical systems of a conventional submarine that aims to evaluate adaptability of this formalism to this system.

Keywords: Petri Net, Differential Predicate Transition net, conventional submarine, propulsion system, early stage design.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – Fluxo de atividades para obtenção de meios.	10
Figura 2.2 – Esquemático simplificado dos sistemas de Eletricidade e Propulsão	22
Figura 2.3 – Exemplos de variáveis de estados de SVC, SED e sistema híbrido.	30
Figura 2.4 – Modelo do <u>objeto</u> de controle no controle SVC.....	32
Figura 2.5 – Modelo do <u>objeto</u> de controle no controle de SED	33
Figura 2.6 – Exemplo de sistema distribuído	35
Figura 3.1 – Modelo em PFS de sequência de atividades (exemplo)	38
Figura 3.2 – Modelo em PFS da situação de conflito (exemplo)	39
Figura 3.3 – Modelo em PFS da situação de paralelismo (exemplo)	40
Figura 3.4 – Modelo em PFS de sincronização após paralelismo (exemplo)	40
Figura 3.5 – Exemplo de Rede de Petri.....	42
Figura 3.6 – Disparo das transições t_2 , t_3 , t_1 e t_4	44
Figura 3.7 – Exemplo de rede predicado transição	48
Figura 3.8 – Disparo da transição t_1	49
Figura 3.9 – Exemplo sistema de armazenamento de combustível (modelo em rede PTD)	51
Figura 3.10 – Evolução de $\theta = 0$ até $\theta = 10$ segundos.....	52
Figura 3.11 – Evolução temporal de $\theta = 10$ até $\theta = 12$ segundos.....	53
Figura 4.1 – Modelo em PFS da operação típica de um submarino.....	62
Figura 4.2 – Modelo em PFS do detalhamento da atividade [Partida]	63
Figura 4.3 – Modelo em PFS do detalhamento da atividade de [Chegada Porto]	64
Figura 4.4 – Modelo em PFS do detalhamento da atividade de [Navegação]	68
Figura 4.5 – Caso de Uso [Navegação] em UML.	72
Figura 4.6 – Diagrama de atividade para a operação do submarino	78
Figura 4.7 – Diagrama de atividades para a atividade <i>Operação Submersa</i>	78
Figura 4.8 – Diagrama de sequência para ordens de velocidade.....	82
Figura 4.9 – Diagrama de sequência, operação de recarga das baterias.....	85
Figura 4.10 – Diagrama de colaboração para o diagrama de sequência da Figura 4.8.	86
Figura 4.11 – Métodos e atributos das <u>classes</u> para o modelo do submarino	87
Figura 4.12 – Diagrama de atividades resultante em UML	88

Figura 4.13 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₁ - Ordem.....	90
Figura 4.14 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₂ - Supervisório.....	91
Figura 4.15 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₃ – Interface do Usuário.....	92
Figura 4.16 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₄ – Interface MEP	92
Figura 4.17 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₅ – Bloco da Propulsão	94
Figura 4.18 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₆ – Interface da Carga Hotel.....	95
Figura 4.19 – Rede de Petri PTD-OO para <u>classe</u> C ₇ – Interface Diesel Gerador	96
Figura 4.20 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₈ – Interface QEP.....	97
Figura 4.21 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₉ - QEP	98
Figura 4.22 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₁₀ - Bateria.....	99
Figura 4.23 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₁₁ - Conversor	100
Figura 4.24 – Rede de Petri PTD-OO da <u>classe</u> C ₁₀ – Carga Hotel.....	101
Figura 4.25 – Rede de Petri PTD-OO para a <u>classe</u> C ₁₃ – Diesel Gerador	102
Figura 4.26 – Verificação de consistência	104
Figura 5.1 – Diagrama de colaboração Estático	109

Sumário

1	Introdução	4
1.1	Justificativa.....	5
1.2	Objetivo.....	7
1.3	Organização do Documento	8
2	Fundamentos	9
2.1	Projeto de Navios.....	9
2.1.1	Requisitos – Determinação de Necessidades.....	11
2.1.2	Projeto de Concepção.....	12
2.1.3	Projeto Preliminar.....	12
2.1.4	Projeto de Contrato	13
2.1.5	Projeto de Detalhamento	13
2.1.6	Construção.....	14
2.1.7	Testes de Mar – Pós-Projeto	14
2.1.8	Processo de Obtenção por outros clientes.....	15
2.2	Submarino.....	16
2.3	Operações com Submarinos	16
2.4	Sistemas de um submarino.....	17
2.4.1	Sistema de Propulsão	18
2.4.2	Sistema de Eletricidade	23
2.4.3	Sistema de Plataforma.....	24
2.4.4	Sistema de Monitoração da Plataforma.....	25
2.5	Simulação no contexto de projeto.....	27
2.6	Modelagem e natureza dos sistemas	28
2.6.1	Sistemas de Variáveis Contínuas (SVCs)	30
2.6.2	Sistemas a Eventos Discretos (SEDs)	32
2.6.3	Sistemas Híbridos	33

2.7	Síntese do capítulo	36
3	Modelagem de Sistemas Híbridos	37
3.1	Production Flow Schema.....	37
3.1.1	Elementos básicos.....	37
3.1.2	Sequência	38
3.1.3	Conflito.....	39
3.1.4	Paralelismo.....	39
3.1.5	Sincronização	40
3.2	Rede de Petri e Sistemas Híbridos	41
3.2.1	Rede de Petri (RdP)	41
3.2.2	Redes de Petri Predicado Transição Diferenciais (RdPPTD)	46
3.2.3	RdPPTD-OO	54
3.3	IMetodologia PFS → RdP PTD-OO.....	56
3.3.1	Metodologia adotada.....	57
4	Modelagem do Sistema de Propulsão e de Eletricidade.....	61
4.1	Passo 1: Identificação dos processos em PFS.....	61
4.1.1	Partida Porto	62
4.1.2	Chegada Porto.....	64
4.1.3	Navegação.....	65
4.2	Passo 2: Identificação de atores externos e interação destes com o sistema de uso	71
4.3	Passo 3: Especificação das Classes e Objetos	73
4.4	Passo 4: Ordenamento das ações das Atividades	76
4.5	Passo 5: Levantamento da Sequência Temporal das Interações	79
4.6	Passo 6: Detalhamento funcional das Classes	89

4.6.1	C ₁ - Ordem	89
4.6.2	C ₂ – Sistema Supervisório	90
4.6.3	C ₃ – Interface do Usuário.....	91
4.6.4	C ₄ – Interface MEP	92
4.6.5	C ₅ – Bloco da Propulsão.....	93
4.6.6	C ₆ – Interface da Carga Hotel	94
4.6.7	C ₇ – Interface Diesel-Gerador	95
4.6.8	C ₈ – Interface do Quadro Elétrico da Propulsão.....	96
4.6.9	C ₉ – Quadro Elétrico da Propulsão	97
4.6.10	C ₁₀ – Bateria	98
4.6.11	C ₁₁ – Conversor	99
4.6.12	C ₁₂ – Carga Hotel.....	100
4.6.13	C ₁₃ – Diesel-Geradores.....	101
4.7	Passo 7: Verificação de Consistência dos Modelos	102
5	Avaliação dos Resultados	106
5.1	Análise estrutural.....	106
5.1.1	Análise dos modelos em RdP PTD-OO.....	107
5.2	Avaliação do Modelo	115
6	Conclusões.....	117
6.1	Principais Contribuições.....	117
6.2	Trabalhos futuros.....	119
7	Bibliografia	121

1 Introdução

Desde a última década, o governo brasileiro tem empenhado recursos, tanto financeiros como humanos, em prol do programa de submarinos – chamado de PROSUB nos documentos oficiais (Brasil 2013) – no qual se prevê a construção de um conjunto de submarinos convencionais e um nuclear para a Marinha do Brasil. Este programa envolve não somente a construção, como também a aquisição de tecnologias para o Brasil, com a absorção de conhecimentos na área de veículos submarinos e no desenvolvimento de novas soluções para os desafios encontrados ao longo de um programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Porém, é importante frisar que a despeito do PROSUB ter uma característica eminentemente militar, a execução completa do programa contribuirá para diversas outras áreas de conhecimento que não estão restritas a área militar, como o uso pacífico da energia nuclear, metodologia para projetos de grande porte e de grande complexidade, além de diversas tecnologias subsidiárias que complementam o projeto a que possuem diversas aplicações, produzindo o chamado “arrasto tecnológico” (Taveira 2007).

Além da iniciativa governamental brasileira, existem diversos esforços na área acadêmica para tecnologias submarinas, em particular veículos não tripulados e autônomos, para diversas finalidades, como econômicas, oceanográficas e militares (YAN *et al.*, 2017)(LV *et al.*, 2016)(SUZUKI *et al.*, 2015)(Jie and Wang 2009). Além disso, conforme destacado por GEERTSMA *et al.* (2017), existe também um esforço científico em pesquisas sobre a autonomia de veículos voltada à área de transporte terrestre, provavelmente por este ter mais apelo popular. De qualquer modo, os estudos também sugerem diversas tecnologias que podem ser exploradas em ambas às áreas, isto é, muitas tecnologias da área automobilística podem ser adequadas ou adaptadas à realidade naval, fazendo com que ocorra um aproveitamento dos conhecimentos gerados em outro campo do estudo.

Considerando o setor naval como um todo, não somente submarinos os quais podem ser tratados como aplicações específicas, 90% de todo o comércio mundial é feito por meio de navios de grande porte, e segundo estudos recentes há sinais de que este número tende a aumentar ainda mais (FANG *et al.*, 2013). Estes estudos apontam

ainda para o crescimento do comércio mundial e da economia e como isto implicaria em uma necessidade de desenvolvimento tecnológico na área naval. Assumindo ainda as considerações dos planos de investimento de longo prazo de companhias dos setores como de: óleo e gás, é evidenciada a necessidade do estudo de novas soluções técnicas principalmente na área de automação e controle de processos, pois pequenos ganhos nesta área podem representar ganhos operacionais econômicos significativos na logística envolvida (LAMNABHI-LAGARRIGUE *et al.*, 2017).

1.1 Justificativa

Na literatura, são encontrados muitos estudos voltados ao comportamento dos sistemas de propulsão em torno de parâmetros chaves como: poluição, eficiência, consumo de combustível, autonomia e níveis de ruído (GEERTSMA *et al.*, 2017; SICK *et al.*, 2016; VÖLKER, 2015). Os estudos baseados exclusivamente nestes parâmetros têm por base uma abordagem de sistemas de variáveis contínuas (SVC). Entretanto, verifica-se que a operação de embarcações e de seus sistemas – entre eles o de propulsão – é feita, na prática, segundo regras operacionais discretas e ocorrência de eventos, os quais implicam em mudanças abruptas no perfil de operação. Entende-se assim que um sistema de propulsão pode ser considerado também um sistema a eventos discretos (SED) (Miyagi 1996).

Justamente em função dos diferentes perfis de carregamento de um navio, diversos estudos propõem novas soluções de controle, para que em cada ponto de operação do navio, se assegure a maior eficiência possível. Evidentemente, estas mudanças de carregamento não são contínuas, tomando como exemplo a operação de rebocadores, na qual estes atuam em baixos níveis de carga enquanto em deslocamento (25% da potência total disponível) e com carga plena durante o trabalho de reboque (100% da potência total disponível) (Völker 2015). Outro exemplo é o submarino convencional¹ que durante a condição de patrulha desloca-se com velocidade baixa e visando minimizar o ruído emitido e a energia consumida das baterias ao passo que em

¹ São chamados submarinos convencionais, aqueles movidos por sistema de propulsão diesel-elétrica com o emprego de baterias quando submerso. Existem ainda submarinos AIP (*Air Independent Propulsion*) e nucleares, os primeiros utilizam células combustíveis em seu funcionamento e os segundos empregam um reator nuclear como fonte primária de energia. Destaca-se que neste trabalho, o objeto de estudo é o submarino diesel elétrico.

condição de ameaça move-se com velocidade máxima, muitas vezes desconsiderando quaisquer critérios de discríção acústica e buscando efetuar o melhor aproveitamento da energia disponível nas baterias para o seu deslocamento (PSALLIDAS *et al.*, 2010). Nota-se que há uma mudança discreta de modo de operação devido a ocorrência de eventos, como o caso de início do trabalho de reboque para o primeiro exemplo ou a detecção de uma ameaça para o segundo, e esta variação no perfil de operação é algo relativamente comum no meio naval, independentemente se a embarcação é civil ou militar.

Ressalta-se ainda que tradicionalmente se considerava que estas variações do estado operacional ocorriam com significativo intervalo de tempo entre os eventos, o que não justificaria a priori um estudo mais detalhado. Todavia, além da revisão desta visão tradicional em função de novos recursos tecnológicos de controle e automação, durante o projeto de uma embarcação, o emprego de um modelo que permita descrever estas transições pode ser explorado para o dimensionamento mais adequado dos componentes do sistema de propulsão, tais como geradores, baterias e motores.

Embora a caracterização por meio de variáveis contínuas se mostre adequada para análise de certos parâmetros sob condições específicas, uma abordagem que trata simultaneamente as variações contínuas e os eventos discretos possibilitariam uma análise mais detalhada do conjunto de variáveis envolvidas nos diferentes perfis de carregamento de um navio e nas transições dos estados operacionais envolvidas. Além disso, com uma modelagem mais detalhada do sistema pode-se avaliar questões como a propagação de falhas, erros de operação e a integração do sistema de propulsão com outros sistemas do navio (como o de navegação, por exemplo).

Adotando a visão de SED, o sistema de propulsão pode ser modelado por uma Rede de Petri (RdP) que é uma técnica reconhecida e que caracteriza os diferentes eventos que influenciam o comportamento de um dado sistema a fim de analisar seu desempenho. O uso de RdP é muito difundido para a descrição de sistemas que possuem regras e procedimentos definidos pelo homem, também chamados de *man-made system* (Miyagi 1996). Um diferencial da RdP em relação a outras técnicas de modelagem de SED é que os modelos resultantes podem ser convertidos de modo relativamente simples e automático numa especificação de uma solução de controle. Assim, a parte do sistema de propulsão que envolve a interação com os operadores e

transição entre os perfis de carregamento podem ser vistas como SED, enquanto as variáveis físicas relacionadas ao comportamento das máquinas e a regulação de parâmetros físicos como velocidade, torque, etc. podem ser tratadas por técnicas de controle usualmente aplicadas a sistemas de variáveis contínuas (GEERTSMA *et al.*, 2017). Por conseguinte, uma forma de descrever este tipo de sistema é com base em formalismos que considerem tanto as variáveis contínuas como os eventos discretos que caracterizam o sistema em questão. Para este tipo de problema, há a abordagem de sistemas híbridos, que são sistemas nos quais se encontram simultaneamente variáveis de estado de natureza contínua e de natureza discreta (VILLANI, 2004; VILLANI *et al.*, 2007).

Um modelo que considere as duas naturezas do sistema simultaneamente permite um ganho nas primeiras fases de um projeto naval, auxiliando no dimensionamento de diversos componentes e subsistemas envolvidos como as fontes principais e emergenciais de energia, a rede elétrica e os motores de propulsão.

Entretanto, não foram identificados estudos na literatura que abordem a operação de navios considerando a abordagem por sistemas híbridos². Esta lacuna na literatura chama a atenção, pois outros tipos de problemas no setor naval (cadeia logística, por exemplo) são tratados como SED e em relação à parte de sistemas de propulsão praticamente existem apenas estudos baseados na abordagem de sistemas de variáveis contínuas.

1.2 Objetivo

Neste trabalho busca-se desenvolver um modelo dos sistemas de propulsão e de eletricidade de um submarino convencional com propulsão diesel elétrica tradicional, similar ao descrito por PEREIRA (2016). A abordagem adotada é de sistemas híbridos (que adota uma visão integrada de sistemas de variáveis contínuas com sistemas a eventos discretos) para o desenvolvimento de modelos baseados na técnica de Rede de Petri e uma extensão desta para permitir a identificação dos estados do sistema baseado

² Foi efetuada uma pesquisa nas bases de dados da *ScienceDirect*, *IEEE* e *Scopus* utilizando como palavras chaves os termos “*naval propulsion*”, “*Petri nets*” e “*hybrid systems*” e não foram encontrados trabalhos relevantes para a modelagem e análise de sistemas de propulsão naval.

no comportamento de variáveis contínuas, assim como na ocorrência de eventos discretos.

Os modelos devem permitir que análises de verificação possam ser feitas, a fim de identificar potenciais falhas de implementação, ou de integração ainda durante a fase de concepção dos sistemas de propulsão naval.

Visa-se, demonstrar a aplicabilidade desta abordagem para o sistema de propulsão de submarinos, possibilitando que outros estudos com outros sistemas de navio sejam realizados ou mesmo com outros paradigmas de operação, bem como para outros casos que apresentam condições análogas de funcionamento.

1.3 Organização do Documento

A organização deste trabalho é dada da seguinte forma:

- No capítulo 1, apresenta-se o tema, seu contexto, justificativa e objetivos do trabalho, expondo com isto uma visão ampla de como o trabalho contribui para projetos de submarinos.
- No capítulo 2, apresenta-se como o projeto de submarino é conduzido na Marinha do Brasil, indicando quais são os principais sistemas considerados, seus componentes, seus objetivos e sua relação com a operação geral do submarino. Além disso, se discute a análise de sistemas via simulação, a modelagem dos processos e particularidades no desenvolvimento destas representações.
- No capítulo 3, apresenta-se as técnicas adotadas na modelagem de sistemas híbridos, incluindo definições a respeito do *Production Flow Schema*, Rede de Petri, Rede Predicado Transição Diferencial e a consideração do paradigma de orientação a objetos a este último tipo de rede.
- No capítulo 4, apresenta-se a modelagem dos sistemas de propulsão e de eletricidade de um submarino convencional. A abordagem para modelagem segue um procedimento descrito no capítulo 3.
- No capítulo 5, apresenta-se a análise do modelo e sua simulação utilizando um procedimento proposto em VILLANI (2004).
- No capítulo 6, tem-se as conclusões e perspectivas deste trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentos

Ao longo deste capítulo são apresentados os fundamentos considerados neste trabalho. Para isto, discute-se inicialmente como é realizado o projeto de um submarino, dando ênfase ao processo de “obtenção” empregado pela marinha brasileira. Em um segundo momento, discorre-se a respeito dos sistemas constituintes de um submarino convencional tripulado e quais são as funções normalmente desempenhadas por cada um dos sistemas.

Nas seções subsequentes, discute-se a importância da técnica de simulação no contexto do projeto e particularidades atinentes à modelagem e à caracterização dos sistemas quanto a sua natureza.

2.1 Projeto de Navios

O projeto de um navio engloba diferentes áreas do conhecimento (mecânica, elétrica, automação, controle, segurança no trabalho etc.), além de apresentar uma grande interdependência entre elas. Por este motivo, estes projetos são tratados como sendo de grande complexidade (LANGLAND *et al.*, 2015) e ao envolverem uma grande gama de disciplinas, a análise dos subsistemas e seus componentes torna-se uma tarefa relativamente complicada ao requerer intrinsecamente que os projetistas detenham tantos saberes distintos. Logo, torna-se imperativo a adoção de uma metodologia de projeto adequada para que a solução a ser desenvolvida seja a melhor, frente aos requisitos a serem considerados. Em função disso e da contínua evolução tecnológica, o setor de construção naval tem demandado por novas soluções nesta área, pois similarmente a outros setores industriais, há uma maior pressão por resultados de maior qualidade em um menor tempo. Essa necessidade associada a complexidade dos projetos nesta área é discutido por diversos autores na literatura (BREFORT *et al.*, 2018) (Chalfant 2015) cuja premissa principal é envidar maiores esforços nas primeiras etapas do projeto de navios a fim de identificar potenciais riscos e dificuldades.

No presente caso, considera-se o “cliente” como sendo a Marinha do Brasil, que adota uma norma para o processo de “obtenção” de navios³ estabelecida pelo Estado Maior da Armada: EMA-420 (Brasil 2002). A Figura apresenta o fluxo de atividades segundo a norma citada.

Figura 2.1 – Fluxo de atividades para obtenção de meios.

Fonte: Adaptado de (Pereira 2016)

Os projetos navais na Marinha do Brasil são divididos essencialmente em 4 grandes atividades: “Determinação de Necessidades” pelo Estado-Maior da Armada (EMA), “Projeto Básico”, “Projeto Executivo” e “Pós-Projeto”. Onde a primeira atividade

³ Cabe a ressalva que esta norma da Marinha aplica-se não só a navios, inclusive submarinos, mas também a aeronaves, carros de combate, viaturas anfíbias e terrestres blindadas e armadas de Fuzileiros Navais, baterias de artilharia e sistemas de mísseis de Fuzileiros Navais, sistemas de sensores, comunicações e guerra eletrônica de Fuzileiros Navais e outros meios ou sistemas considerados como não convencionais (Brasil 2002) apud (Taveira 2007).

consiste na elaboração de dois documentos: os Requisitos de Estado-Maior (REM) e os Requisitos de Alto Nível de Sistemas (Rans); a segunda compreende o Projeto Básico que transcreve os requisitos formulados na primeira atividade em especificações técnicas de uma solução ou produto viável e que atende ao máximo os requisitos do “cliente”. A terceira atividade, “Projeto Executivo”, envolve o projeto de detalhamento e a construção propriamente dita do produto. Finalmente, há ainda a última atividade: o “Pós-Projeto” que trata dos testes em mar para validar o desempenho do produto antes que esse seja entregue ao “cliente”. A seguir a discussão assume como solução ou produto o projeto de um submarino.

2.1.1 Requisitos – Determinação de Necessidades

Nesta primeira atividade do procedimento de obtenção de um submarino, são elaborados os documentos principais para início das atividades de projeto propriamente ditas. Inicialmente, são identificadas as demandas do cliente para um novo submarino as quais são oriundas da visão estratégia da Força, em consonância com a Estratégia Nacional de Defesa e com o Livro Branco de Defesa (Brasil 2013). Além disso, algumas decisões possuem caráter sigiloso por tratarem de assunto relativo à defesa nacional, consequentemente não existem informações públicas sobre este ponto na literatura (Taveira 2007).

Com base nestas primeiras necessidades, são elaborados os REM (Requisitos de Estado-Maior) que trarão consigo as decisões em termos de desempenhos globais do submarino para que sejam posteriormente remetidos ao Comando de Operações Navais, para que os Rans (Requisitos de Alto Nível de sistemas) sejam formulados. Neste documento, são detalhados os REM, apresentando requisitos específicos para cada sistema presente no submarino. Neste ponto são formados os primeiros requisitos sobre as partes de propulsão, geração de energia elétrica, comunicações, equipamentos, controle, auxiliares, habitabilidade, sensores e outro sistemas (CAMARGO *et al.*, 2016).

Finalmente, com base nos Rans são elaborados os Estudos de Exequibilidade (EE) cuja função é demonstrar quais requisitos conformados podem ser convertidos em soluções técnicas, i.e., dada a necessidade do cliente como é possível construir um submarino que atenda aos requisitos propostos.

Após a verificação de exequibilidade e aprovação pelo Comandante da Marinha, dá-se início ao processo de projeto com a finalidade de obtenção do novo submarino.

2.1.2 Projeto de Concepção

Após aprovado o Estudo de Exequibilidade, os requisitos analisados e definidos para os diversos subsistemas são então traduzidos para requisitos ao nível de engenharia. Onde as características gerais são convertidas em especificações técnicas considerando as soluções disponíveis no mercado.

Consequentemente, há grande interlocução entre o setor operativo, que representa o cliente, e os projetistas e especialistas encarregados do “Projeto Básico” (Pereira 2016). O principal objetivo desta fase é apresentar ao cliente uma possível solução (ou soluções, conforme o caso) de projeto, isto é, um submarino que atenda aos requisitos navais demandados e simultaneamente seja o produto de soluções técnicas disponíveis em mercado.

Diferentemente da etapa anterior cujo término é caracterizado pela aprovação de um estudo de viabilidade técnica, a conclusão desta fase está vinculada a documentos como: relatórios, memórias de cálculo, dados de simulações e arranjo físico preliminar do submarino.

2.1.3 Projeto Preliminar

Tendo em mãos uma solução candidata, os projetistas a refinam de forma a obter o devido detalhamento a respeito de soluções técnicas que inicialmente são consideradas mais difíceis de serem estimadas, como o desempenho estrutural, hidrodinâmico, etc. Para, então, especificar uma solução com informações mais concretas e precisas sobre o que será contratado e, finalmente, construído.

A grande marca desta fase é o maior nível de detalhe a respeito do submarino. Além das características supracitadas, os projetistas estimam com maior precisão as necessidades de propulsão, de energia elétrica, de combustível e de equipamentos necessários para cumprimento de outros requisitos, como uma estimativa de custo total do submarino. Além disto, o arranjo físico geral do submarino já deve incluir os

equipamentos considerados críticos e principais⁴, além das rotas de tubulações e cabos elétricos.

Ressalta-se que muitos trabalhos presentes na literatura se referem softwares de auxílio ao projeto nas etapas de *early-stage design*⁵ (projeto inicial) (BREFORT *et al.*, 2018) (CHALFANT, 2015) (CHALFANT *et al.*, 2012) (GINN *et al.*, 2017), pois nas duas primeiras fases do projeto há um grande volume de informações dispersas entre os projetistas. Isto ocorre devido à quantidade de subsistemas a serem definidos associados a diferentes possibilidades em termos de equipamentos e funcionalidades a serem consideradas.

2.1.4 Projeto de Contrato

Esta última fase do “Projeto Básico” consiste em produzir a documentação necessária à contratação da construção do submarino. O objetivo desta fase é identificar informações e subsídios suficientes para dar início à negociação com fornecedores com vistas ao estabelecimento de contratos para construção.

2.1.5 Projeto de Detalhamento

Após assinatura dos contratos, tem-se o início do “Projeto Executivo”. As informações com o detalhamento de todas as partes aqui se referem a questões de mérito construtivo, com especificações de ordens de construção, procedimentos de testes e verificação de sistemas. Espera-se que nesta fase as mudanças de soluções sejam as menores possíveis, visto que com contratos estabelecidos, aquisições de novos produtos ou soluções diferentes daqueles apontados nas negociações têm impacto relevante nos custos e nos prazos.

⁴ A classificação como equipamentos críticos ou principais, do ponto de vista de arranjo, não está diretamente relacionada à função executada pelo componente e sim ao volume ocupado. Importante destacar que dentro do contexto de projeto naval, as palavras “crítico”, “principal” e “secundário” assumem distintos significados em função da área a que se referem.

⁵ A acepção do termo *early-stage design* é feita na seção 2.1.8.

2.1.6 Construção

A última fase do “Projeto Executivo” consiste na construção efetiva do submarino. Durante esta fase podem ocorrer alterações que conduzam a revisão do “Projeto de Detalhamento”, porém normalmente estão restritas a mudanças em nível de arranjo físico ou devido à indisponibilidade temporária ou total de algum equipamento. Casos mais complexos envolveriam divergências que poderiam comprometer a continuidade desta fase, obrigando a equipe a retomar etapas anteriores em casos mais drásticos, apesar de que as fases anteriores de projeto são concebidas a fim de mitigar ao máximo este tipo de ocorrência.

2.1.7 Testes de Mar – Pós-Projeto

A última etapa do ciclo de obtenção do submarino consiste nos testes de mar para validar o desempenho previsto ao longo das etapas anteriores. Durante a sequência de testes, são investigados se os equipamentos adquiridos cumprem as funções esperadas, considerando procedimentos especiais e cenários operativos. Além disto, são realizados os treinamentos do pessoal que comporá a tripulação do submarino, esclarecendo os últimos aspectos de operação em conjunto com o cliente a fim de dirimir as dúvidas.

Eventualmente, em caso de não cumprimento de algum requisito nesta etapa, são discutidas soluções que não obriguem o retorno do submarino ao estaleiro e casos mais complexos que podem exigir a derrogação de algum requisito com o cliente. Contudo, de forma similar à etapa de construção, este tipo de evento deve ser tratado em momentos anteriores do projeto, visto que no “Pós-projeto” o produto está praticamente concluído, o que faz com as possíveis mudanças sejam bastante limitadas.

Por fim, o submarino é entregue ao setor operativo do cliente, tendo início seu período de operação, momento que encerra o processo de obtenção. A partir disso, o cliente passa a se responsabilizar pela manutenção do submarino adquirido seguindo as especificações produzidas durante o projeto.

2.1.8 Processo de Obtenção por outros clientes

Embora a seção anterior tenha o foco no processo de “obtenção” da Marinha do Brasil, é mister conhecer procedimentos de outros tipos de clientes. A revisão apresentada por CHALFANT (2015) mostra como se dá o caso na marinha norte-americana, tornando possível traçar um paralelo ao brasileiro, onde a obtenção de um submarino (*Design Stages*) é dividida em três grandes fases: “*Conceptual Design*”, “*Engineering Design*” e “*Production Design*” (“projeto conceitual”, “projeto de engenharia” e “projeto de produção”, em tradução livre).

Na primeira fase – *Conceptual Design* – são discutidas as funcionalidades desejadas e as alternativas em vista de uma solução (ou de soluções) candidata(s) para o submarino. Na segunda fase – *Engineering Design* –, composta por duas subfases: *Preliminary Project*⁶ e *Contract Design*, é similar ao “Projeto Básico” brasileiro, onde se busca construir uma solução visando a contratação de fornecedores. Na terceira fase – *Production Design* – tem-se a construção do submarino e seu projeto de detalhamento.

Cabe ressaltar que muitos dos artigos da literatura discutem soluções para “projeto em fase inicial” ou *early-stage design*. Nos trabalhos analisados, a acepção deste conceito remete ao “Projeto Preliminar” (BREFORT *et al.*, 2018), contudo há também a ideia de que todo o trabalho desenvolvido anterior a fase de produção possa ser considerado como *early-stage design* (Chalfant 2015).

A *priori*, embora exista uma diferença na terminologia, esta dissertação adota a acepção de que *early-stage design* refere-se ao “Projeto Preliminar” e ao “Projeto de Concepção”. A tarefa de determinação de necessidades e “Projeto de Contrato”, embora incluídas na visão dos trabalhos do ESRDC (*Electric Ship Research and Development Consortium*) (COOPER *et al.*, 2017), não estão compreendidas no presente trabalho.

⁶ A análise de alternativas e o *Preliminary Project* correspondem ao conjunto: “Projeto Conceitual” e “Projeto Preliminar” no processo da Marinha brasileira. A análise funcional corresponde à construção dos documentos REM e Rans, sendo fonte de informações para constituição dos requisitos que serão utilizados na análise de alternativas.

2.2 Submarino

Os submarinos são navios que possuem a capacidade de imergir e emergir de forma controlada e, diferentemente de outros projetos navais, apresentam peculiaridades quanto ao seu projeto, como, por exemplo, a necessidade de um sistema de controle mais preciso e com alto grau de confiabilidade do seu centro de gravidade, pois em função dos processos de emersão e imersão, ocorre o embarque de água que afetam significativamente a posição do centro de gravidade do navio (Pereira 2016).

Além disso, os submarinos diferenciam-se de outros navios por uma limitação física do número de membros de sua tripulação que deve ser otimizada para sua plena operação. Segundo as informações obtidas por Pereira (2016), submarinos com comprimento médio de 75 metros e diâmetro de 6 a 7 metros e, com peso de cerca de 1,7 mil toneladas, possuem tripulações da ordem de 40 pessoas em média. Embora, se tratem de valores médios, estes valores servem como base para estimativas iniciais de um novo projeto de submarino. Pois, muitos destes parâmetros servem como referências iniciais para um novo projeto, uma vez que com eles é possível se estimar as funcionalidades, quantidades de insumos, além de premissas de conforto.

Todos estes elementos concorrem com os objetivos do submarino em um novo projeto, conseqüentemente, é relevante compreender como outros submarinos já projetados funcionam e sob quais premissas se deram cada um de seus projetos. O ciclo de projeto de navios, por adotar em geral a Espiral de Projeto, necessitam de informações prévias para consecução das tarefas seguintes, logo a base de conhecimento obtida na construção de um submarino é empregada para a elaboração e construção de um próximo meio similar.

2.3 Operações com Submarinos

Conhecer os objetivos de um submarino, isto é, as capacidades operacionais e o potencial dos equipamentos e recursos instalados é de fundamental importância para definição dos seus sistemas. No contexto militar, o emprego dos submarinos é feito em vista de garantir a supremacia de uma nação em determinada região marítima, executando missões com objetivos de: dissuadir o adversário, confrontar outros submarinos, confrontar outros navios de superfície ou negar o uso do mar. Discussões

mais detalhadas sobre cada um destes tópicos podem ser obtidas nas referências (Carvalho 2009), (Sarro 2016) e (Pereira 2016).

No contexto civil, o emprego de veículos submarinos, é feito em vistas de pesquisa oceânicas com finalidades diversas, como avaliação de enlaces de comunicação acústica submarina (LV *et al.*, 2016), na coleta de dados do oceano a fim de proporcionar contribuições econômicas e sociais quanto ao seu emprego. Além disso, há um grande esforço de pesquisas recentes neste tipo de veículo visando seu controle e sua operação (YAN *et al.*, 2017) (ZHANG *et al.*, 2016). Estas pesquisas centram-se em soluções para facilitar a operação destes veículos, e de meios para comunicação visando a recuperação dos dados obtidos ao longo da operação.

Uma aplicação mais incomum é a construção de submarinos para fins recreativos com custos significativamente elevados (Gross 2017), feito por estaleiros especializados na construção deste tipo de embarcação, não há, no entanto, pesquisas acadêmicas sobre o tema ou discussões publicadas sobre os desafios atinentes a esta área.

2.4 Sistemas de um submarino

Em geral, existe um conjunto de sistemas que compõem para um submarino convencional, entre eles se têm: propulsão, eletricidade, plataforma, monitoramento da plataforma, arquitetura e arranjo físico. Cada um desses sistemas é responsável por processos e funções do submarino, determinando quais componentes, atuadores e controladores são empregados.

Quando já construído e em operação os sistemas de um submarino não são tratados da mesma forma, pois, por exemplo, os sistemas relacionados com a parte de estruturas e arranjo foram determinados previamente, cabendo reavaliação destes em processos de *retrofit* ou de manutenção que exija imobilização temporária do submarino. Por outro lado, a operação do submarino pode ser entendida como o resultado da interação dos sistemas de: propulsão, eletricidade, plataforma e sistema de monitoramento da plataforma. Em submarinos militares, tem-se ainda o sistema de combate.

Associando a questão da operação com o processo de “obtenção” adotada pela Marinha do Brasil, uma possível forma de entender os procedimentos dentro de uma metodologia de projeto é o Ciclo V (*V-cycle*) na qual são definidos os (i) requisitos, com

base nestes são estabelecimentos os (ii) sistemas, subsistemas e componentes a partir disso se tem a (iii) a construção e posterior (iv) verificação da funcionalidade de componentes, subsistemas e sistemas. Em outras palavras, no início do projeto se define segundo uma abordagem de visão em níveis hierárquicos os macroprocessos e os sistemas responsáveis por cada um desses processos e isso é detalhado até que se atinja uma solução viável. Em seguida, tem-se a concepção, composição e integração dos componentes, dos subsistemas e sistemas assim como os testes que os validam de acordo com as especificações geradas.

Ao considerar esta metodologia, durante a especificação é mandatório verificar se os requisitos derivados das necessidades do cliente são atendidos. Logo, ao pensar na operação e se o submarino cumpre ou não seus objetivos, a verificação individual de cada sistema componente embora seja condição necessária não é suficiente para garantir que o submarino cumpre seu propósito, sendo imperioso que seja efetuada também uma verificação integrada desses sistemas. Na ótica de projeto, os testes de integração são etapas fundamentais para verificação das soluções adotadas para os sistemas e, para isto é necessário conhecer como cada um dos sistemas do submarino é constituído e opera e, como este se relaciona com outros sistemas e qual sua contribuição para o desempenho global da embarcação.

De forma a elucidar este ponto, nas próximas subseções são apresentados cada um dos sistemas do submarino e seus principais componentes, destacando as principais características de cada um deles e como é sua interação com os outros sistemas do submarino.

2.4.1 Sistema de Propulsão

Este sistema é encarregado de duas funções: geração de energia elétrica e produção de torque na linha de eixo dos hélices para efetivo deslocamento do submarino. Considerando o caso particular do submarino convencional, a geração de energia é realizada por meio de grupos diesel-geradores, onde a principal função destes é a carga das baterias de bordo e substituição delas em caso de emergência devido à ocorrência de falhas nos elementos de armazenamento. A outra parte do sistema de propulsão, responsável pela geração de empuxo, é composta pelos conversores de frequência, pelo motor elétrico de propulsão, pela linha de eixo e pelo hélice do

submarino. Estes componentes em conjunto realizam a tarefa de converter energia elétrica em mecânica para deslocamento do submarino.

Considerando as recomendações da IEC 60092 (IEC 1994) para propulsão elétrica, é importante que esta parte do sistema de propulsão seja projetada de forma a mitigar falhas que conduzam a perda total da propulsão do submarino, isto é, havendo uma falha em algum componente não é aceitável a perda total de nenhuma das duas funções do navio. A norma recomenda a adoção do critério de “falha simples”⁷ para projeto do sistema, conseqüentemente, devem existir no mínimo dois grupos diesel-geradores e dois motores elétricos de propulsão (MEP). Este último caso, a priori conduz ao entendimento de que somente se pode operar com propulsão elétrica por meio de uma linha de eixo dupla, contudo dado que o caso é um submarino, e embora seja uma solução que atenda a norma, o uso de duas linhas de eixo não é solução tradicionalmente empregada, sendo a mais comum o uso de motores de dupla armadura. Estas máquinas elétricas possuem a vantagem de operar como se fossem duas máquinas sobre um mesmo eixo, garantindo, portanto, a segregação entre as máquinas que assim atendem ao critério da norma. Destarte, é adotado para o presente caso um sistema de propulsão com apenas uma única linha de eixo e com motor elétrico de propulsão com dupla armadura.

Referente a geração de energia, tomando o critério de “falha simples”, a abordagem inicial sugere o uso de dois grupos geradores diesel e também que o submarino disponha de duas redes elétricas segregadas, uma em cada bordo. Isto faz com que sejam necessárias duas fontes geradores por bordo, totalizando quatro grupos geradores-diesel. O funcionamento destas máquinas dentro da operação do submarino convencional ocorre somente quando este se encontra na superfície para carga das baterias, implicando em um uso intermitente dos grupos geradores que somente funcionam em momentos específicos da operação. Outra restrição é que só há

⁷ O critério de “falha simples” para sistemas navais estabelece que uma falha qualquer não pode resultar na perda completa da função desempenho pelo equipamento faltoso. Exemplo: a falha de uma bomba de resfriamento não pode ensejar a perda completa do circuito de resfriamento do navio, por conseguinte, é necessário que o projetista elabore uma solução que evite esta perda seja adicionando outra bomba de resfriamento ou outro mecanismo auxiliar que impeça este evento em particular.

disponibilidade oxigênio para queima do combustível (diesel) quando o submarino tem acesso direto ao ambiente acima do nível da água.

No tocante aos outros sistemas, a propulsão possui interface física ou lógica com:

- O sistema de eletricidade, responsável por fornecer energia aos motores de propulsão (MEPs) e armazenar nas baterias a energia elétrica produzida nos grupos diesel geradores;
- O sistema de plataforma, responsável por fornecer água para resfriamento dos componentes da propulsão e por armazenar combustível nos tanques adequados;
- O sistema de monitoração da plataforma, para enviar sinais de sensores instalados nos equipamentos da propulsão e geração de energia elétrica e receber as ordens do operador da plataforma para os diversos atuadores do sistema de propulsão.

Há, ainda, uma particularidade quanto à alimentação dos MEP por meio do sistema de eletricidade. Máquinas elétricas desenvolvem maiores velocidades com maiores níveis de tensão, mas esta condição não é facilmente obtida com apenas um único conjunto de baterias. A fim de ampliar as capacidades operacionais do navio por meio de uma maior velocidade, o quadro elétrico da propulsão deve promover um rearranjo nas fontes de alimentação do ponto de vista da máquina elétrica. Como existem dois bordos de alimentação e em cada um deles se tem uma bateria que alimenta uma das armaduras do MEP, é possível reorganizar as baterias de modo a fornecer energia de diferentes formas: totalmente segregada, em paralelo ou em série. Estas configurações são atribuídas ao Quadro Elétrico da Propulsão.

Na primeira configuração, a alimentação tem por objetivo atender a critérios de segurança (como falha simples) e outros elencados pelos projetistas, pois separando os dois circuitos de bateria não há quaisquer chances de falha comum entre eles. Na segunda configuração, em paralelo, as baterias são arranjadas como duas fontes em paralelo, podendo fornecer maiores níveis de corrente ao sistema de propulsão que se traduzem em maiores níveis de torque. Na conexão em série, as baterias são

organizadas como duas fontes de tensão série elevando o valor efetivo de tensão sobre as duas armaduras, permitindo com o que o motor desenvolva maiores velocidades⁸.

A Figura 2.2 apresenta o esquemático da rede elétrica do navio, com os Diesel Geradores (DG), Baterias (BB), Carga Hotel (CH)⁹, Quadro da Propulsão (QP), Conversores (CC) e Motor Elétrico de Propulsão (MEP), as cores verde e vermelha indicam equipamentos para boreste e bombordo do navio, respectivamente, a cor branca é empregada para indicar equipamento sem bordo definido. Nesta figura também é possível perceber que existe uma divisão entre o escopo dos sistemas de propulsão e eletricidade (descrito na próxima seção), onde o primeiro responde pela geração de energia a bordo e propulsão propriamente dita e o segundo pela distribuição e armazenamento de energia elétrica. Esta divisão dos sistemas é empregada usualmente em projetos de submarinos (Pereira 2016)

⁸ A operação de um Quadro Elétrico de Propulsão é uma decisão estratégica do ponto de vista do submarino, neste trabalho será adotada esta visão para fins de modelagem. Porém, outros submarinos podem empregar outros tipos de QEP dados seus objetivos.

⁹ Entende-se por carga hotel (CH) toda e qualquer carga a bordo do submarino, exceto o motor de propulsão.

Figura 2.2—Esquemático simplificado dos sistemas de Eletricidade e Propulsão

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.2 Sistema de Eletricidade

O sistema de eletricidade do submarino compreende as baterias e o subsistema de distribuição de energia (composto por quadros principais e conversores de energia). Uma das funções deste sistema é fornecer energia para todos os sistemas de bordo em tensões contínuas e alternadas, considerando as peculiaridades de cada tipo de consumidor. Outra atribuição é o armazenamento de energia gerada pelos grupos diesel-geradores e a posterior distribuição da energia armazenada quando o submarino está mergulhado. Esta última função desempenha papel de grande relevância, pois é determinante para estimar tempo máximo de mergulho, isto é, tempo entre recargas da bateria, e serve indiretamente para medir o alcance operacional do submarino dadas as condições de combustível, eficiência e consumo de energia.

Em linhas gerais, o sistema de eletricidade deve: assegurar o consumo eficiente e muitas vezes mínimo de energia elétrica e, minimizar o impacto de falhas elétricas de forma a garantir a operação contínua do submarino. De forma similar ao sistema de propulsão, o projeto do sistema de eletricidade deve considerar que a capacidade de deslocamento do submarino não seja perdida com a falha eventual de um único equipamento, consequentemente há duas redes distintas de alimentação, uma para cada bordo do submarino¹⁰, cada uma com um conjunto próprio de baterias. Na arquitetura aqui apresentada, há dois geradores-diesel por bordo, uma bateria e uma representação genérica da “carga hotel”, nela há uma ligação tracejada entre os dois barramentos principais de cada bordo, indicando uma possível reconfiguração em caso de indisponibilidade de uma das duas baterias. Considerando os aspectos de segurança envolvidos e dado que o submarino quando mergulhado depende exclusivamente da energia proveniente das baterias, a rede elétrica deve ser projetada de tal forma que blackouts não ocorram.

Em relação às interfaces, o sistema de eletricidade possui interfaces físicas e lógicas com:

¹⁰ A fim de manter a consistência de nomenclatura e visando facilitar análise e operações futuras, a divisão em duas redes elétrica é feita de forma a ser coincidente com a divisão física do submarino em dois bordos: boreste e bombordo.

- O sistema de propulsão, responsável por fornecer energia para carga das baterias;
- Os outros sistemas de bordo, para prover energia. Porém, com certo nível de interação com o sistema de resfriamento e de combate a incêndio para alguns quadros elétricos e outros componentes (como os conversores DC/AC).
- O sistema de monitoração da plataforma, para enviar sinais da planta de distribuição e armazenamento de energia e receber sinais para os atuadores relacionados.

Um exemplo da operação do sistema de eletricidade: é quando se tem uma ordem de velocidade ao controle da propulsão, de modo que o sistema deve assegurar o nível de energia necessário via Quadro Elétrico da Propulsão.

O sistema de distribuição de energia é encarregado de controlar o nível de tensão das baterias, efetuar *load shedding*¹¹ em vista da preservação de um nível mínimo seguro de carga nas baterias. Considerando que o submarino convencional possui duas fontes de energia, as baterias (uma por bordo) e grupos diesel-geradores dedicados ao carregamento das baterias, sempre que o nível das baterias atingir certo valor, o submarino deve retornar à superfície do mar e iniciar o procedimento de carga, acionando os grupos diesel-geradores e utilizando estes para alimentação elétrica dos consumidores de bordo e recarga das baterias.

Este sistema inclui os sensores de nível de combustível que indicam quanto ainda resta de diesel a bordo e qual a distância máxima que o submarino pode se manter afastado do porto/navio de reabastecimento.

2.4.3 Sistema de Plataforma

O sistema da plataforma engloba todos os sistemas auxiliares do submarino como: combate a incêndio, ar condicionado, água para refrigeração, ejeção de lixo, conforto da tripulação, controle de *trim* (tanques de lastro e de combustível) (Pereira

¹¹*Load shedding*: é a ação empreendida pelo sistema de eletricidade de desligar compulsoriamente grupos de consumidores da “carga hotel” em vistas da redução de consumo energético. No contexto de um submarino, esta é uma medida drástica empregada para preservação de um nível seguro de carga das baterias.

2016). A lista de subsistemas descrita tem o propósito de ilustrar as diversas funções que o submarino executa além daquelas de deslocamento (relacionadas em grande parte à propulsão). Assim como os outros sistemas, os subsistemas e componentes da plataforma estão sujeitos as mesmas restrições de projeto, devendo manter suas funcionalidades em caso de falha, o que conduz a projetos com sistemas redundantes ou com proteções adicionais contra falhas.

Por executar múltiplas tarefas distintas entre si, os subsistemas pertencentes ao sistema de plataforma têm características próprias. Pode-se considerar como constituintes da plataforma, os subsistemas de:

- Refrigeração e ventilação, compreendendo o condicionamento do ar e os circuitos de água para resfriamento;
- Controle de *trim*, incluindo tanques de lastro e de combustíveis;
- Conforto e habitáveis, envolvendo os sistemas de suporte à vida e com garantia de uma qualidade mínima;
- Processamento de lixo;
- Segurança das instalações (combate de incêndio, reserva de oxigênio);
- Outros auxiliares (lubrificação, por exemplo);

Referentes às interfaces, o sistema de plataforma interage com:

- o sistema de eletricidade, para receber a energia elétrica, fornecer água para refrigeração e prover ventilação ao compartimento de baterias;
- o sistema de propulsão, para fornecer refrigeração para os componentes e monitorar o armazenamento de combustível para os grupos diesel geradores;
- o sistema de monitoração da plataforma, em consonância com os sistemas anteriores, enviando os sinais de sensores e do estado de subsistemas e recebendo os sinais para os atuadores dos diversos subsistemas.

2.4.4 Sistema de Monitoração da Plataforma

A monitoração da plataforma (PMS, *platform management system*), a despeito do nome que sugere apenas a função de observação, é, de fato, encarregado de

supervisionar todos os sistemas do submarino¹². A supervisão é feita diretamente por operadores humanos e por meio de interfaces com dispositivos de comando e de monitoração.

Na área de Sistemas de Eventos Discretos, o trabalho elaborado por Costa (2010) discorre sobre a modelagem de sistemas de gerenciamento da plataforma no qual apresenta meios de empregar as técnicas associadas a SED traçando uma analogia direta com os sistemas supervisórios observados em instalações industriais.

Em linhas gerais, o PMS concentra as informações dos diversos sensores espalhados pelos componentes de cada sistema do submarino, bem como as diversas ordens a serem despachadas aos atuadores. Como atua como sistema supervisório, é por meio dele que o supervisor/comando do submarino envia ordens de incremento de velocidade ou de mudanças na planta considerando os intertravamentos devidos: tais como os de sequência, de partida, de desligamento de máquinas e outros subsistemas de forma a garantir a operação segura do submarino.

Assim como os outros sistemas, é necessário que o PMS também apresente elevado grau de confiabilidade para garantir a operação do sistema por meio de medidas de mitigação das falhas (usando equipamentos redundantes) ou estabelecendo rotinas alternativas de controle e monitoração a despeito da disponibilidade do sistema supervisório.

No trabalho de Reyes (2004), é possível identificar o emprego de Redes de Petri na modelagem de sistemas C3I (*Communication, Command, Control and Intelligence*) cuja importância é percebida na atuação propriamente militar. A discussão deste tipo de sistema, embora esteja fora do escopo deste trabalho, é relevante pois discorre sobre como estes sistemas em particular influenciam outros sistemas de um navio. No caso de um submarino, informações de navegação e posição geográfica, por exemplo, são obtidos por este tipo de sistema.

¹² Em submarinos militares, o sistema de combate possui sistema supervisório próprio.

2.5 Simulação no contexto de projeto

Durante o “Projeto Básico” de um submarino, é necessário que diversos parâmetros sejam devidamente considerados para fins de subsidiar as escolhas possíveis na fase do “Projeto de Detalhamento”. Outrossim, nestas primeiras etapas a concepção de soluções candidatas também permite que diferentes equipamentos sejam estudados como soluções, aumentando o rol de possíveis escolhas pela equipe de projeto. Em vista disto, os esforços iniciais buscam delinear características globais do submarino: estimando inclusive o espaço físico ocupado pelos equipamentos ou quais serão colocados a bordo considerando os requisitos de origem técnica e de escolha do cliente, por exemplo.

Nestas primeiras etapas, as definições de arranjo físico são fundamentais para estabelecer limites de volume e peso dos equipamentos a fim de garantir estabilidade e fluutuabilidade do submarino. Com este primeiro delineamento, as restrições impostas convergem para determinadas soluções. Porém, é importante destacar que este é um processo iterativo, pois alguns volumes de bordo são consequências dos requisitos do cliente, por exemplo, ao estabelecer um valor desejado para velocidade máxima, o número de opções de soluções para motores de propulsão começa a ser reduzido onde, quanto maior for o valor de velocidade também maior é o porte do motor necessário, o que pode inviabilizar fisicamente o submarino ou financeiramente (considerando que pode se chegar a uma solução técnica viável, porém com custo inadequado para o orçamento do projeto).

Os trabalhos de TAVEIRA (2007) e CAMARGO *et al.* (2016) discutem como se conduz cada um dos passos em cada etapa, lembrando que a adoção de metodologias como a espiral de projeto implica na reavaliação frequente das decisões, especialmente nas fases iniciais do projeto no qual ainda pouco se conhece da solução técnica final.

Fica assim evidente, que o uso da simulação como técnica de análise auxilia no estudo das soluções, porque ao testar estas sob diferentes condições/cenários, os projetistas podem verificar de forma relativamente rápida e ágil quais são mais ou menos adequadas dadas as restrições consideradas. Com isso, pode-se avaliar como diferentes equipamentos ou mesmo soluções de sistemas inteiros se adéquam a realidade de projeto (Chung 2004). Neste âmbito, ao pensar na solução do sistema de

propulsão, embora descritivamente ela envolva elementos que podem ser estudadas individualmente, a visão integrada destes na sua forma de sistema é capaz de prover informações mais úteis ao projetista.

Durante o “Projeto de Concepção”, os projetistas fazem as primeiras estimativas do submarino, utilizando dados de projetos passados e informações de fornecedores e, a partir da combinação destas com os requisitos de projeto, uma primeira solução é delineada. Ao empregar técnicas de análise, como a simulação, é possível obter resultados preliminares que indicam a viabilidade técnica de algumas propostas, tais como se o MEP atende as necessidades de velocidade, dado uma estimativa de propulsor e casco, ou se o conjunto MEP + baterias + diesel-geradores cumpre a autonomia esperada para o submarino dado certo perfil operacional. Considerando situações que representem adequadamente o que se espera de um submarino, a simulação pode fornecer contribuições ao projeto ao minimizar retrabalhos futuros ou reduzir o número de soluções candidatas. Todavia, é importante destacar que as simulações nas primeiras fases do projeto fornecem ideias de cunho mais gerais sobre as soluções propostas, uma vez que ao início do projeto poucas informações estão disponíveis.

Consequentemente, é imprescindível que conforme o projeto do submarino avance, tendo em vista a Espiral de Projeto, a simulação dos sistemas seja realimentada com novos dados, contendo as atualizações do projeto e as novas restrições de operação, de fornecedores ou de cliente. Para esta simulação também é necessário seguir uma metodologia, pois a simulação em si está sujeita às restrições temporais e orçamentárias.

Durante o “Projeto Básico” do submarino, onde características gerais são definidas, a simulação é também usada para levantar estimativas mais detalhadas de consumo elétrico, de combustível, de capacidades da propulsão e de autonomia que são exigências de um projeto consistente capaz de ser atendido por fornecedores, quando contratos são firmados em vistas da construção efetiva do meio.

2.6 Modelagem e natureza dos sistemas

O emprego da simulação é um meio pelo qual o projetista de um sistema tem como aferir o quão suas premissas estão corretas e como elas poderiam ser ajustadas,

dados os cenários e condições simulados, para se obter um melhor desempenho do sistema projetado. Ao decidir por simular sistemas¹³ o projetista deve analisar como transpor as informações da solução a ser avaliada para modelos de forma organizada e coerente. Para isto, deve adotar um formalismo para modelagem que atenda às suas necessidades, isto é, uma descrição formal adequada para seu problema, considerando as suas particularidades e características. Esta noção é de grande valia, pois a qualidade de uma simulação é influenciada pelo formalismo adotado de modo que o projetista deve ponderar as vantagens e desvantagens ao empregar um ou outro formalismo (VILLANI *et al.*, 2007).

Uma das primeiras análises que o projetista deve fazer antes de dar início ao estudo de cenários via simulação é identificar a natureza do sistema que busca analisar, se ele é de variáveis contínuas, eventos discretos ou híbridos (quando possuem elementos de ambas as naturezas). Para cada natureza existe uma grande gama de técnicas de modelagem e, dados os objetivos da simulação, cabe ao projetista decidir qual visão de sistema será adotada para sua modelagem. Em função disto, há uma reflexão e decisão quanto a qualidade do modelo. Entende-se por qualidade do modelo como uma métrica que avalia o quanto um determinado modelo representa um sistema real. Esta percepção é importante, pois é um meio de indicar que o modelo, a despeito das hipóteses simplificadoras assumidas pelo projetista, equivale ao sistema real.

Ao considerar a natureza do sistema, conforme elencado no parágrafo anterior, o desenvolvedor pode modelar empregando técnicas/ferramentas baseadas em teorias de sistemas de variáveis contínuas, de sistemas a eventos discretos ou de sistemas híbridos. Cada uma possui uma melhor adequabilidade a uma teoria ou outra e para aferir corretamente, o desenvolvedor deve considerar quais comportamentos da planta e do controlador são mais relevantes. Se o objetivo for estimar oscilações contínuas de parâmetros físicos (pressão, corrente, vazão, tensão), a modelagem via variáveis contínuas é a mais adequada, por outro lado, se o interesse é em avaliar a evolução de variáveis que são afetadas somente quando da ocorrência de eventos discretos

¹³ Na literatura existe uma variedade distinta de definições formais para “sistema” (Cassandras and Lafortune 2008), neste texto a referência a este termo remete ao conceito apresentado no IEEE: a combinação de componentes que agem em conjunto a fim de realizar uma função que não seria possível com qualquer uma das partes individuais.

(Cassandras and Lafortune 2008), como a emissão de comandos operacionais (dos tipos liga/desliga, abre/fecha, etc.) a abordagem de sistemas a eventos discretos apresenta os melhores resultados. Enquanto que no caso de um sistema que apresente ambas as características como um sistema onde as regras de controle alteram-se em função de eventos discretos a abordagem híbrida é a mais indicada (VILLANI *et al.*, 2007).

A Figura 2.3 ilustra como são vistos os comportamentos de cada um dos sistemas ao longo do tempo, dados suas variáveis de estados. Nela pode-se notar que para o sistema a eventos discretos (SED) a variável de estado assume valores discretos com variações instantâneas (em 6, 15 e 25 segundos), enquanto para o sistema de variáveis contínuas (SVC) há a variação gradual do valor da variável de estado. Por fim, o comportamento do sistema híbrido apresenta ambas as características, com uma evolução contínua em algumas partes e alterações abruptas devido à ocorrência de eventos discretos.

Figura 2.3 – Exemplos de variáveis de estados de SVC, SED e sistema híbrido.

Fonte: adaptado de VILLANI *et al.* (2007)

2.6.1 Sistemas de Variáveis Contínuas (SVCs)

Os SVCs são sistemas nos quais não há descontinuidade nos valores das variáveis ao longo do tempo, como no exemplo da variável indicada pela linha pontilhada na Figura 2.3, isto indica que nos SVCs as variáveis representam em geral quantidades físicas – aceleração, pressão, vazão, temperatura, corrente elétrica – cujas variações ocorrem continuamente ao longo do tempo. Importante destacar que os SVCs podem

ser discretizados *no tempo*, isto é, terem suas variáveis amostradas a uma taxa fixa ao longo do tempo, neste caso o sistema ainda é visto como de variáveis contínuas, porém para sua análise são utilizados outros tipos de ferramentas matemáticas.

Tradicionalmente, SVCs são analisados por meio de equações diferenciais, as quais podem apresentar característica linear ou não, variante ou invariante no tempo ou transcendentais. Atualmente, existe vasta literatura na área para análise e modelagem deste tipo de sistema (Cassandras and Lafortune 2008). No caso de sistemas discretizados, a descrição destes é feita por meio de equações de diferenças para as quais existem também ferramentas para análise, inclusive para mensurar o efeito da própria discretização (Ogata 2010).

Para sistemas modelados por meio de equações diferenciais, tem-se a possibilidade de usar a transformada de Laplace para facilitar a análise da resposta do sistema frente aos possíveis sinais de entrada. Na teoria de controle tradicional, diagramas de lugares das raízes, de Bode, de Nyquist – por exemplo – conferem meios de avaliar o comportamento do sistema. Modelos em espaço de estados permitem analisar sistemas com diversas variáveis de entrada e de saída, ampliando o escopo das técnicas anteriores. No caso dos sistemas regidos por equações de diferenças, pode-se utilizar a transformada Z para modelar e analisar. O emprego desta transformada é equivalente à de Laplace e permite avaliar o comportamento do sistema frente a diferentes sinais de entradas.

Ainda sobre SVC, os sistemas podem apresentar características como linearidade e invariância no tempo (Ogata 2010). Contudo, existem sistemas que não apresentam estas características e necessitam de técnicas mais específicas para sua modelagem e análise, como as baseadas na teoria de Lyapunov para sistemas dinâmicos não lineares (Megretski 2003).

Em linhas gerais, pode-se afirmar que o modelo de um sistema de controle de SVC é representado pelas equações (1) e (2) cuja representação gráfica pode ser vista na Figura 2.4. As variáveis em negrito representam vetores, com $\mathbf{x}$ representado o vetor de variáveis de estado de tamanho n , $\mathbf{u}$ o vetor de entradas do sistema de tamanho p , $\mathbf{y}$ o vetor de saídas de tamanho q , $\dot{\mathbf{x}}$ é o vetor de derivadas das variáveis de estado de tamanho n , A é a matriz de estado de tamanho $n \times n$, B é a matriz de entrada de

tamanho $n \times p$, C a matriz de saída de tamanho $q \times n$ e D é a matriz de alimentação de tamanho $q \times p$.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$

Figura 2.4–Modelo do sistema de controle de SVC

Fonte: adaptado de MIYAGI (1996).

2.6.2 Sistemas a Eventos Discretos (SEDs)

No caso de SED existem apenas estados discretos das variáveis de interesse como, por exemplo: quantidade de pessoas numa sala, número de extintores disponíveis ou de máquinas em operação etc. A modelagem de SED busca tratar tipicamente de sistemas construídos pelo homem (Villani 2004), isto é, sistemas onde a variação contínua de grandezas físicas não é relevante, mas sim o número finito de estados possíveis (Miyagi 1996).

A estrutura de um sistema de controle SED é distinta daquela para SVC, uma vez que a presença de estados discretos do sistema altera a maneira como são quantificadas as variáveis de estado. As equações (3) e (4) apresentam a representação formal de um SED e a representação gráfica delas é feita na Figura 2.5.

$$z(k+1) = hz(k), v(k) \quad (3)$$

$$w(k) = qz(k), v(k) \quad (4)$$

Figura 2.5 – Modelo do sistema de controle de SED

Fonte: adaptado de (Miyagi 1996).

Aqui as variáveis em negrito representam vetores e $\mathbf{z}$ representa o vetor dos n estados dos m elementos estruturais, $\mathbf{v}$ é o vetor dos sinais de entrada de atuação sobre os m elementos estruturais, $\mathbf{w}$ é um vetor de saída resultante da combinação dos m elementos estruturais e n estados assumidos por estes e h e q são funções matriciais. Dada esta estrutura, é possível representar um SED por meio de técnicas como autônomos, teoria de filas ou Rede de Petri (DONG *et al.*, 2008).

2.6.3 Sistemas Híbridos

Embora se possa considerar sistemas de variáveis contínuas e de eventos discretos como visões distintas e independentes entre si, de fato, muitos sistemas na realidade possuem características de ambos simultaneamente, o que caracteriza um sistema híbrido. Isto faz com que sejam necessários formalismos específicos para lidar com o desenvolvimento de modelos e simulações para este tipo de sistema.

De uma maneira mais simples, um sistema que apresente eventos discretos que alteram grandezas físicas contínuas e que fazem parte de seu objetivo, pode ser analisado por meio de uma abordagem de sistemas híbridos. A título de exemplo, um sistema de ar condicionado para uma sala poderia ser tratado como um sistema híbrido, onde a temperatura (contínua ao longo do tempo) é a variável que se deseja controlar por meio do aumento ou redução do fluxo de ar refrigerado, porém a presença de fontes de calor no ambiente é regida por eventos como o ingresso de pessoas ou o acionamento de um motor. Mesmo sendo possível adaptação de um modelo SVC para conceber este sistema exemplo, isto envolve incluir uma série de perturbações no modelo que são ativadas segundo uma descrição SED. Outro possível exemplo que representaria a natureza híbrida de qualquer sistema é a ocorrência de falha de algum

dos componentes do dispositivo de controle, de algum sensor ou atuador, que resultaria na falta de ação intempestiva ou no comportamento equivocado do sistema. De maneira geral, um sistema submetido à interferência de ações humanas ou que responde de forma diversa a intervenções discretas e que provocam descontinuidades na planta pode ser visto como sistema híbrido.

Sistemas híbridos são caracterizados – também – como sendo distribuídos de modo que suas funções em geral são segmentadas em níveis distintos de decisão/supervisão/controle como de planejamento (gerenciamento) e de operação (automáticas ou manuais). Neste tipo de sistema, existe uma hierarquia entre as funções a fim de preservar a segurança e a manutenção dos equipamentos (Miyagi 1996). A existência de diferentes níveis de controle ocasiona em uma operação híbrida, onde os controladores mais próximos do objeto de controle manipulam variáveis contínuas atinentes e os dispositivos de controle de níveis mais superiores efetuam a operação coordenada na forma de eventos discretos de vários outros controladores em níveis inferiores. A Figura 2.6 ilustra esta hierarquia entre os controladores.

Figura 2.6 – Exemplo de sistema distribuído

Fonte: Adaptado de MIYAGI (1996)

Os sistemas híbridos possuem também técnicas para auxílio na modelagem e no projeto de sistemas de controle. A Rede de Petri Híbrida é um formalismo que mescla em um único contexto estados com variação contínua de parâmetros e estados sem variação dos parâmetros, perfazendo uma descrição de ambas as naturezas em uma única representação gráfica (DONG *et al.*, 2008) (Ozgun e Murvet 2015) (CHEN *et al.*, 2017). Outra abordagem é o uso de autômatos híbridos, os quais incorporam aos autômatos finitos discretos o comportamento contínuo no tempo das variáveis de estado do objeto de controle (Bayoudh e Trav 2008). Por outro lado, alguns autores optam por descrever seus sistemas por meio de metodologias tradicionais de SVCs incorporando os eventos como intervenções ou descontinuidades na planta (Yurenko and Kharchenko 2018). Alternativamente, existem abordagens que combinam Rede de Petri temporizadas à lógica fuzzy (MIC *et al.*, 2018) (Letia and Kilyen 2016), obtendo resultados que apontam para maior flexibilidade na modelagem a despeito do aumento da complexidade dos modelos resultantes em função das características do formalismo.

Outra possibilidade para modelagem de sistemas híbridos é o uso de Rede Predicado Transição Diferenciais (VILLANI *et al.*, 2007) que preservam características da

Rede de Petri no tocante aos eventos discretos ao mesmo tempo em que considera a natureza contínua das variáveis, incorporando estes elementos nas transições da rede. No mesmo trabalho, VILLANI *et al.* (2007) descrevem como o paradigma de orientação a objetos pode ser incorporado a Rede Predicado Transição Diferencial a fim de sistematizar e ampliar a capacidade de descrição de sistemas.

2.7 Síntese do capítulo

Com base na descrição do que um projeto de submarino envolve e nas diferentes naturezas dos sistemas, infere-se o importante papel do sistema de propulsão nessas embarcações e a necessidade de investigar metodologias e procedimentos para seu estado. Confirma-se que este sistema pode ser modelado e analisado como um sistema híbrido, dado que coexistem variáveis contínuas no tempo (velocidade do navio, rotação no eixo, quantidade de energia nas baterias, consumo elétrico) com variáveis discretas que são afetadas com base em regras e decisões humanas ou eventos. Outro aspecto que conduz a esta mesma conclusão é a presença do sistema de monitoração da plataforma compondo um sistema distribuído de controle, onde cada sistema é responsável por regular suas variáveis enquanto o PMS é encarregado da coordenação dos diversos controladores.

3 Modelagem de Sistemas Híbridos

Neste capítulo são apresentados o Production Flow Schema e a Rede de Petri Predicado-Transição Diferenciais Orientada a Objetos (Rede PTD-OO) como técnicas que sistematizam a modelagem de um sistema híbrido.

3.1 Production Flow Schema

O *Production Flow Schema* (PFS) apresentado em MIYAGI (1996) como uma técnica de modelagem de sistemas com o foco em macro-eventos, isto é, que adota uma abordagem funcional hierárquica do sistema a partir de um modelo conceitual com alto nível de abstração (SANTOS FILHO *et al.*, 2001). Intuitivamente, pode-se entender o PFS como uma abordagem *top-down*, onde em um primeiro momento são descritas as principais atividades do sistema e como elas se relacionam entre si e, depois com base nesta primeira descrição tem-se início o processo de *refinamento sucessivo* que permite o detalhamento dos processos. Conforme apontado por SANTOS FILHO *et al.* (2001), é importante ressaltar que o PFS não foca no comportamento dinâmico do sistema, mas apenas na estrutura das funcionalidades do sistema.

O PFS é usado para identificar cada sub-processo e possui flexibilidade para ser usado em conjunto com outras técnicas que focam a descrição do comportamento dinâmico de sistemas, tais como o MFG (Miyagi 1996), E-MFG (SANTOS FILHO *et al.*, 2001). As próximas seções apresentam os elementos que compõem um modelo em PFS e as estruturas mais comuns em PFS para processos sequenciais e paralelos.

3.1.1 Elementos básicos

Um modelo em PFS de um sistema qualquer é composto por alguns elementos estruturais que representam partes deste sistema. A Tabela 1 apresenta estes elementos e a que parte correspondem na descrição do sistema.

Tabela 1 – Elementos básicos do PFS

Elemento	Explicação
Elemento ativo que corresponde a um macro-evento que representa a realização de transformação (alteração de valor) de itens.
Elemento passivo correspondente ao local onde itens entram e saem de uma atividade.
Arcos indicam a direção do fluxo de itens, conectam atividades a distribuidores e vice-versa.

O grafo resultante da composição dos elementos estruturais serve de descrição da organização do sistema, fornecendo uma visão organizada e coerente das diversas atividades compreendidas e como elas se inter-relacionam. Qualquer arranjo de sistema pode ser representado por meio de composições específicas de atividades, distribuidores e arcos, dentre elas sequência, conflito ou paralelismo de operações. Estas situações aparecem em sistemas onde há um ordenamento específico, parcial, ou total de operações – como uma ordem de comando – e recursos limitados que competem para realização de tarefas.

3.1.2 Sequência

A sequência de operações é uma situação na qual o sistema deve realizar um número de atividades ordenadamente, isto é, a próxima atividade deve aguardar a conclusão da atividade anterior. A Figura 3.1 apresenta um modelo em PFS de um processamento, composta por três atividades: **[Ligar Sinalização]**, **[Acionar Lubrificação]** e **[Destravar Máquinas]**.

Figura 3.1 – Modelo em PFS de sequência de atividades (exemplo)

Fonte: elaborado pelo autor

3.1.3 Conflito

Chama-se conflito de operação, a situação na qual um dado sistema possui mais de uma possibilidade de ação.

Figura 3.2 – Modelo em PFS da situação de conflito (exemplo)

Fonte: elaborado pelo autor

No exemplo da Figura 3.2, após a atividade **[Reduzir Velocidade]** o sistema pode dar início a uma de duas atividades: **[Manobra para Posição 1]** ou **[Manobra para Posição 2]**. Destaca-se que o conflito também pode ocorrer entre mais do que duas atividades, onde o distribuidor pode apontar para n atividades.

Este caso é relativamente comum quando existem diferentes possibilidades para um dado sistema em função de restrições de recursos disponível para execução simultânea de diferentes atividades.

3.1.4 Paralelismo

Outra situação comum em sistemas é a ocorrência de atividades simultâneas ou paralelas, as quais utilizam diferentes recursos disponíveis para executar suas ações. Enquanto o conflito é caracterizado pela competição entre diferentes atividades, no paralelismo a presença de recursos suficientes permite que duas ou mais atividades ocorram simultaneamente.

Na Figura 3.3, o modelo em PFS exemplifica um sistema com três atividades paralelas **[Acelerar Motores]**, **[Acionar Sinalização]**, **[Manter o curso]** que ocorrem após o término da atividade **[Posicionar Embarcação]**. Embora este exemplo seja reduzido, espera-se que após a conclusão de cada uma das atividades exemplificadas o sistema dê continuidade a sua operação.

Figura 3.3 – Modelo em PFS da situação de paralelismo (exemplo)

Fonte: elaborado pelo autor.

3.1.5 Sincronização

Após a execução de um conjunto de atividades paralelas, em vista da continuidade da operação do sistema podem existir pontos de sincronização, representados por distribuidores que indicam que o sistema só avança (evolui sua dinâmica) para a próxima atividade quando do término de todas as atividades anteriores em paralelo.

Figura 3.4 – Modelo em PFS de sincronização após paralelismo (exemplo)

Fonte: elaborado pelo autor.

Dado o exemplo da Figura 3.4, após a execução das atividades simultâneas **[Fechar porta]**, **[Acionar Válvula 1]**, **[Acionar Válvula 2]** há um ponto de sincronismo antes da atividade **[Abrir Escotilha]**. Outra forma de entender o sincronismo é como

uma “barreira” para o sistema, pois enquanto todas as atividades predecessoras ao sincronismo não forem concluídas, o sistema fica aguardando e não evolui para a atividade seguinte.

3.2 Rede de Petri e Sistemas Híbridos

3.2.1 Rede de Petri (RdP)

A Rede de Petri (RdP) foi originalmente proposta por Carl Adam Petri em 1962 como um formalismo para modelagem de processos em sistemas a eventos discretos (SED). Em função da sua capacidade de descrição das características intrínsecas dos SEDs, este formalismo se popularizou como meio de representar o comportamento dinâmico deste tipo de sistema (VILLANI *et al.*, 2007).

Segundo a teoria de Grafos, pode-se classificar um modelo em RdP como um grafo orientado bipartido com dois tipos de vértices chamados de *lugares*¹⁴ e *transições* e arestas orientadas chamadas de *arcos*. Uma das propriedades dos grafos bipartidos é que vértices de um mesmo grupo não se conectam entre si, isso significa que na RdP *lugares* somente conectam-se às *transições* e vice-versa. Outra característica da RdP é que os *lugares* podem conter marcas em números positivos e inteiros e a distribuição de *marcas* nos lugares do grafo da RdP é chamada de *marcação*. O comportamento dinâmico de um SED é representado por meio de uma evolução das *marcas* no grafo da RdP de modo que cada *marcação* indica um estado do sistema e a alteração da *marcação* segue uma regra específica de disparo das *transições* (VILLANI *et al.*, 2007).

Um exemplo de RdP é apresentado na Figura 3.5, ele modela um processo sequencial compostos por duas bases de dados (BD 1 e BD 2), uma unidade de pré-processamento dos dados (Processador 1) e uma unidade de conversão de dados (Processador 2). Cada um dos *lugares* representados está associado a um estado local do respectivo elemento do sistema. As *marcas* em p_1 representam os dados no BD 1, analogamente *marcas* em p_4 indicam a existência de dados no BD 2. A *marca* em p_2 indica que o Processador 1 está ocupado e pré-processando os dados, bem como *marcas* em p_3 representam dados sendo convertidos. *Marcas* em p_5 e p_6 indicam que o

¹⁴ Os termos específicos da RdP: *lugar*, *transição*, *marcas*, *marcação* e *arcos* são indicados em itálico neste trabalho.

Processador 1 e o Processador 2 estão disponíveis, respectivamente. Considerando estas informações, pela marcação apresentada na Figura 11, sabe-se que há 2 dados no BD 1 e tanto o Processador 1 como o Processador 2 estão ociosos e não há nenhum dado no BD 2.

Figura 3.5 – Exemplo de modelo de um processo em Rede de Petri

Fonte: elaborado pelo autor

Cada uma das *transições* (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5) está associada com algum evento do sistema. Para o sistema da Figura 3.5, t_1 representa a chegada de novos dados ao BD 1, t_2 indica a remoção de dados do BD 1 para pré-processamento destes pelo Processador 1. A *transição* t_3 representa a saída dos dados do Processador 1 para o Processador 2 e t_4 indica o término da conversão dos dados e remoção destes para o BD 2. Por fim, t_5 indica o despacho dos dados em lotes de 4 unidades. Nestes modelos se pode identificar os *arcos* de entrada e de saída das *transições*, os primeiros conectam um *lugar* a uma *transição* e os últimos uma *transição* a um *lugar*. Destaca-se que os *arcos* podem ter *pesos*¹⁵ cujo valor tem significado diferente para os *arcos* de entrada e de saída das *transições*. Para os primeiros a quantidade de *marcas* indica quantas são consumidas dos *lugares* de acordo com as regras de disparo da *transição* e para os últimos significa quantas *marcas* são adicionadas ao *lugar* de acordo com as regras de disparo da *transição*.

O comportamento do sistema é representado pela aplicação das regras de *disparo* das *transições*, as quais correspondem à ocorrência de eventos. Consequentemente, assim como um evento altera o estado de um SED, um disparo

¹⁵ Os pesos dos *arcos* são números naturais indicados próximos aos *arcos* na Rede de Petri. Normalmente, quando um *arco* possui peso unitário o valor “1” é omitido da representação gráfica. Na Figura 3.5, o *arco* que conecta o *lugar* p_4 à *transição* t_5 tem peso 4 e todos os outros possuem peso unitário.

muda também o estado do modelo em RdP, e para que isto ocorra, é necessário que a *transição* esteja *habilitada* para seu disparo.

Uma *transição* qualquer é considerada habilitada sempre que os *lugares* de entrada contêm *marcas* em número maior ou igual ao *peso* dos arcos de entrada. Por exemplo, na RdP da Figura 3.5 a *transição* t_2 é considerada habilitada sempre que houver ao menos uma *marca* em p_1 e uma *marca* em p_5 .

A fim de ilustrar o comportamento dinâmico de uma RdP, a Figura 3.6 apresenta a evolução da *marcação* da rede com o disparo das *transições* t_2 , t_1 , t_3 e t_4 . No disparo de t_2 , as *marcas* em p_1 e p_5 são consumidas e uma *marca* é adicionada a p_2 , no disparo de t_3 , as *marcas* em p_2 e p_6 são consumidas e uma *marca* é adicionada a p_3 e outra *marca* acrescentada em p_5 . Na sequência, t_1 (que sempre está habilitada, pois não possui *arcos* de entrada) dispara adicionando uma nova *marca* a p_1 e, por fim, ocorre o disparo de t_4 com o consumo da *marca* em p_3 e adição de uma *marca* a p_4 e a p_6 . Ao final dos disparos, um novo conjunto de *transições* está habilitado e uma nova *marcação* pode ser atingida.

Figura 3.6 – Disparo das transições t_2, t_3, t_1 e t_4

Fonte: elaborado pelo autor.

Formalmente, a Rede de Petri é definida como: $N = \langle S, M_0 \rangle$, onde:

- S é uma estrutura definida como 4-tupla $\langle P, T, Pre, Pos \rangle$, onde:
 - $P = p_1, p_2, \dots, p_m$ é um conjunto finito de *lugares*.
 - $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de *transições*.
 - $P \cap T = \emptyset, P \cup T \neq \emptyset$
 - $Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ define os *arcos* de entrada das *transições*.
 - $Pos: T \times P \rightarrow \mathbb{N}$ define os *arcos* de saída das *transições*.
- $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}$ é a *marcação* inicial da rede.

Pre e Pos podem ser representadas como matrizes de incidência dos *arcos* de entrada e de saída respectivamente, em ambas, as linhas correspondem aos *lugares* e as colunas às *transições*. Por exemplo, a RdP da Figura 3.5 tem como matrizes Pre e Pos as apresentadas nas Equações (5) e (6), respectivamente.

$$Pre = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Pos = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Com base nestas definições, é possível computar a evolução dinâmica da RdP que modela um sistema por meio da equação de estado da RdP apresentada na Equação (7).

$$M = M_0 - Pre \cdot s + Pos \cdot s \quad (7)$$

M é a *marcação* final da rede e s é um vetor de disparos de dimensão n , onde n é o número de *transições* existentes na RdP. O valor de cada elemento do vetor $s[i]$ é a quantidade de vezes que a *transição* t_i é disparada. Como exemplo, considerando a *marcação* inicial e a sequência de *disparos* da Figura 3.6, tem-se a expressão (8).

$$M = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Devido à comprovada capacidade de representação de sistemas da RdPs, muitos estudos dedicam-se a ampliar a versatilidade da RdP incluindo novos elementos, como *marcas* coloridas ou temporização. A RdP colorida inclui diferenciações entre as *marcas*, o que aumenta a capacidade de incluir informações no grafo, mas também aumenta a complexidade da rede uma vez que a habilitação das *transições* não mais só é dada pela simples presença ou não de *marcas* nos *lugares*, como também pela cor da *marca*. Dada a cor da *marca*, o evento pode conduzir a um *lugar* ou outro. As RdP temporizadas incluem um elemento para contagem de tempo, indicando que uma *transição* só ocorre após certo tempo de estar habilitada. Este novo elemento na RdP permite, por exemplo, que uma operação vinculada a tempo possa ser representada.

Estas variações da RdP visam ampliar a capacidade de descrição, mas ainda no escopo restrito ao universo dos SED. Contudo, existem proposições na literatura que visam ampliar as capacidades da RdP, tais como: as *Fuzzy Logic Enhanced Time Petri Nets* (FLETPN) que combinam elementos da lógica fuzzy com RdP temporizadas a fim de se incluir uma descrição para sistemas híbridos (Letia and Kilyen 2016). A Rede de Petri Predicado Transição Diferenciais e sua ampliação com o acréscimo do paradigma de orientação a objetos é uma proposta dentro deste contexto (Villani 2004).

3.2.2 Redes de Petri Predicado Transição Diferenciais (RdPPTD)

Embora a RdP descrita anteriormente represente adequadamente muitos sistemas reais, ela apresenta duas limitações significativas que comprometem a aplicabilidade deste formalismo a sistemas ditos complexos ou de grande porte. A primeira limitação é a restrição da RdP na representação de manipulação de dados, isto é, para tratar disto a estrutura da rede aumenta muito sua complexidade quando diversos processos ou tipos de dados estão envolvidos. A segunda limitação reside no fato de que nos modelos em RdP não se distingue os diferentes níveis de comando (VILLANI *et al.*, 2007). Por exemplo, um sistema com funcionalidades de planejamento,

programação, supervisão de tarefas e controladores de operações e atuadores é representada em um único diagrama com inúmeros *lugares* e *transições* que compromete a visualização/entendimento do sistema como um todo.

Em função disso, há na literatura trabalhos e pesquisas científicas que visam aumentar a capacidade de modelagem da RdP para resolver estes problemas. As redes com características ampliadas são chamadas de RdP de alto nível. Dentre os exemplos mais conhecidos, destaca-se a RdP Colorida (Jensen 1996) que atribui cores às *marcas* e condicionam a habilitação das *transições* a presença de *marcas* com as devidas cores, permitindo desta forma que diversas interpretações possam ser consideradas. Outra proposta, é a RdP Predicado-Transição, que atribui as *marcas* um vetor de variáveis e a habilitação das *transições* é uma composição lógica do vetor de variáveis de cada *marca* (VILLANI *et al.*, 2007).

Fundamentalmente, os dois tipos de RdP divergem em como se desenvolve a lógica de disparo das *transições*, na RdP Colorida ela é proposicional, isto é, não depende de variáveis diretamente. Enquanto na RdP Predicado-Transição a regra de disparo das *transições* obedece a uma lógica de primeira ordem que inclui variáveis em sua composição.

Formalmente, uma RdP Predicado-Transição é descrita como uma 3-tupla $N_{PT} = \langle S, A, M_0 \rangle$, onde:

- S é uma RdP definida pela 4-tupla $\langle P, T, Pre, Pos \rangle$.
- A é uma anotação de N_{PT} , definida pela 4-tupla $A = \langle X, A_x, A_c, A_a \rangle$, onde:
 - X é um conjunto de variáveis.
 - A_x associa um vetor de X variáveis a cada *arco*.
 - A_c associa uma *condição* de habilitação a cada *transição*. Esta condição de habilitação usa o vetor de variáveis A_x dos *arcos* de entrada.
 - A_a associa uma *ação* a cada *transição*. A *ação* define os valores das variáveis A_x dos *arcos* de saída empregando os valores das variáveis A_x dos *arcos* de entrada.
- M_0 é a *marcação* inicial da rede. Cada *marca* é detém um vetor de variáveis similar ao vetor dos *arcos*. A *marcação* inicial também define o valor inicial destas variáveis.

A Figura 3.7 apresenta uma RdP Predicado-Transição com três *lugares* p_1 , p_2 e p_3 e uma *transição* t_1 , sujeita a uma *condição* de habilitação $A_c(t_1)$ e com uma *ação* associada $A_a(t_1)$. As *marcas* no *lugar* p_1 possuem um conjunto de variáveis dado por $\langle v, i \rangle$, as no *lugar* p_2 outro conjunto $\langle k \rangle$ e, por fim, no *lugar* p_3 as *marcas* contêm o conjunto $\langle m, k \rangle$.

Figura 3.7 – Exemplo de Rede de Petri Predicado-Transição

Fonte: elaborado pelo autor.

A dinâmica do sistema modelado em RdP Predicado-Transição também é descrita pelo disparo das *transições*, tomando como o exemplo a rede da Figura 3.7, percebe-se que a *transição* t_1 está habilitado para disparo, pois sua *condição* de habilitação é atendida pelas marcações dos *lugares* p_1 e p_2 . A Figura 3.8 apresenta a *marcação* da rede após o disparo de t_1 .

Figura 3.8 – Disparo da *transição* t_1

Fonte: elaborado pelo autor.

Com o disparo de t_1 as *marcas* nos *lugares* p_1 e p_2 são consumidas e uma nova *marca* é adicionada ao *lugar* p_3 segundo as regras de *ação* da *transição*. Este exemplo ilustra uma forma de modelar sistemas, contudo a RdP Predicado-Transição ainda considera operar a modelagem de SED.

Para tratar de SVC, é possível expandir as RdP Predicado-Transição incluindo a evolução temporal de variáveis por meio de equações diferenciais, transformando-a em RdP Predicado-Transição-Diferencial (PTD). Pois, como foi evidenciado no exemplo da Figura 3.8, nas RdP Predicado-Transição os valores das variáveis somente são alterados com o disparo de uma *transição* (i.e., ocorrência de um evento), já nas RdP PTD como as variáveis são regidas também por equações diferenciais, isto é, seus valores são atualizados com o transcorrer do tempo mas a habilitação e disparo das *transições* pode mudar isso abruptamente.

Para tornar este ponto mais claro, formalmente uma RdP Predicado-Transição-Diferencial é descrita como uma 3-tupla $N_{PT} = \langle S, A, M_0 \rangle$, onde:

- S é uma RdP definida pela 4-tupla $\langle P, T, Pre, Pos \rangle$ e o peso máximo dos arcos é 1.
- A é uma anotação de N_{PT} , definida pela 5-tupla $A = \langle X, A_p, A_e, A_j, A_f \rangle$, onde:
 - X é um conjunto de variáveis.
 - A_p associa um vetor de variáveis X_{pi} de variáveis X para cada *lugar* p_i .
 - A_e associa uma função de habilitação e_i para cada *transição* t_i . A função de habilitação emprega as variáveis A_p do *arco* de entrada.
 - A_j associa uma função de junção j_i para cada *transição* t_i .
 - A_f associa um sistema de equações diferenciais f_i para *lugar* p_i . As variáveis do sistema de equações devem as mesmas variáveis A_p do *lugar* p_i .
- M_0 é a *marcação* inicial da rede. Cada *marca* detém um vetor de variáveis similar a dos *lugares*. A *marcação* inicial também define o valor das variáveis das *marcas* no tempo $\theta = 0$.¹⁶

Com base nesta definição, a Figura 3.9 ilustra um exemplo de sistema, isto é, um processo de armazenamento de diferentes tipos de recipientes cujos volumes variam de 1 a 20 litros e, somente recipientes com volume superior ou igual a 4 litros são processados. Recipientes com volumes inferiores a 4 litros são acumulados em um *buffer* para processamento posterior.

¹⁶ Neste trabalho, para as RdP PTD e PTD-OO, a fim de evitar confusões da variável de tempo com as *transições*, utiliza-se t_i para indicar a i -ésima *transição* e θ como variável para representação do tempo.

Figura 3.9 – Exemplo sistema de armazenamento de combustível (modelo em rede PTD)

Fonte: elaborado pelo autor.

O lugar p_1 representa o *buffer* de recepção dos recipientes com volume m . O lugar p_2 é onde ocorre o armazenamento do recipiente com volume atual v e volume máximo m , este lugar possui ainda uma equação diferencial f_2 associada a ele, que indica a quantidade de fluido no recipiente. O lugar p_3 é o *buffer* de saída com os recipientes cheios com volume v . O lugar p_4 é o *buffer* para processamento posterior de recipientes com volume r . E, o lugar p_5 representa a quantidade de slots disponíveis para receber recipientes.

A *transição* temporizada t_1 só ocorre depois de estar habilitada por 10 segundos e tem como função de junção j_1 – que é a função que estabelece um valor inteiro entre 1 e 20 – que é o volume de material recipiente em p_1 . A *transição* t_2 é considerada habilitada sempre que houver slots disponíveis em p_5 e um recipiente disponível em p_1 , a função de junção j_2 indica que ao iniciar o processo de armazenamento do recipiente está vazio. A *transição* t_3 é considerada habilitada quando um recipiente é completamente cheio de combustível, conforme indicado pela função de habilitação e_3 . A *transição* t_4 é considerada habilitada sempre que existir ao menos um recipiente com volume inferior a 4 litros em p_1 , a função de junção j_4 aponta para um recipiente vazio com volume inadequado igual a r .

Dada a *marcação* inicial M_0 da Figura 3.9, é apresentada na Figura 3.10 e na Figura 3.11 a evolução do sistema até o tempo de 12 segundos.

Figura 3.10 – Evolução de $\theta = 0$ até $\theta = 10$ segundos

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 3.11 – Evolução temporal de $\theta = 10$ até $\theta = 12$ segundos

Fonte: elaborado pelo autor

Nos primeiros 10 segundos ocorrem os disparos das *transições* t_2 , t_4 e t_1 , as duas primeiras já habilitadas e a última habilitada após o transcurso do período de 10 segundos. Durante o período de 10 segundos, o recipiente originariamente em p_1 de valor $< 12 >$ começa a ser preenchido, com a chegada da nova *marca* com valor $< 9 >$ em p_1 , a *transição* t_2 é novamente habilitada (dado que ainda há *slots* disponíveis para receber recipientes) e uma nova *marca* com valores $< 0, 9 >$ é adicionada a p_2 . Na sequência, aos 12 segundos, o primeiro recipiente encontra-se totalmente cheio, habilitando, portanto, a *transição* t_3 que então é disparada, movendo o recipiente para o buffer de saída e liberando o *slot* para que outro recipiente possa ser preenchido.

Este exemplo ilustra como a RdP PTD modela variáveis de SVCs e SEDs simultaneamente, sendo assim um formalismo para sistemas híbridos.

Entretanto, embora a RdP PTD consiga agregar elementos de SVC e SED, ela ainda carece de recursos que permitam modularidade. Isto é, similar ao problema da RdP original, sistemas complexos derivam grafos relativamente extensos que prejudicam a capacidade analítica dos sistemas por meio da visualização gráfica. De maneira a contornar estas dificuldades, é proposto por VILLANI (2004) a inclusão do formalismo de orientação a objetos (OO) na RdP PTD.

3.2.3 RdPPTD-OO

A ideia de orientação a objetos (OO) começou a ser empregado na computação em meados dos anos 60, porém só se popularizou como um paradigma na década de 80. Desde então é utilizado tanto como meio de organização e estruturação de programas computacionais como uma maneira de projetar e conceber sistemas. Neste paradigma, a entidade central é o “objeto” que representa um conceito abstrato e um sistema que é composto da interação de diferentes “objetos”.

Conforme discutido na seção anterior, embora a RdP PTD aumente a capacidade de descrição da RdP original, contemplando inclusive sistemas híbridos, essa abordagem ainda carece de meios de lidar com sistemas complexos compostos por grande quantidade de elementos, operações e interações resultando invariavelmente a um grafo relativamente grande e de difícil entendimento. Considerando a combinação do paradigma OO com a RdP PTD pode-se conceber um modelo na forma de uma rede

composta por diversos objetos pertencentes a diferentes classes, onde estas possuem suas próprias redes.

Formalmente, uma RdP PTD-OO é definida por um conjunto de *Sub RdP* PTD-OO: $N_{OO-PTD} = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$, onde n é o número de classes que compõem o modelo do sistema, onde uma sub RdP PTD-OO é definida como uma 3-tupla, $C_i = \langle N_i, A_i, M_{0_i} \rangle$, onde:

- N_i é uma RdP definida pela 4-tupla $\langle P_i, T_i, Pre_i, Pos_i \rangle$ com *arcos* de peso unitário e onde:
 - $P_i = p_{1_i}, p_{2_i}, p_{3_i}, \dots, p_{m_i}$ é um conjunto finito de *lugares*.
 - $T_i = t_{1_i}, t_{2_i}, t_{3_i}, \dots, t_{n_i}$ é um conjunto finito de *transições*.
 - $P_i \cap T_i = \emptyset, P_i \cup T_i \neq \emptyset$.
 - $Pre_i = P_i \times T_i \rightarrow (0,1)$.
 - $Pos_i = T_i \times P_i \rightarrow (0,1)$.
- A_i é uma anotação de $C_i, A_i = \langle X_i, A_{ei}, A_{ji}, A_{fi} \rangle$, onde:
 - X_i é um conjunto de variáveis.
 - A_{pi} associa um subconjunto X_{pk_i} de variáveis X_i para cada *lugar* p_{k_i} .
 - A_{ci} associa uma função de habilitação e_{k_i} para cada *transição* t_{k_i} . A função e_{k_i} é uma expressão booleana que emprega as variáveis X_i como argumentos de entrada.
 - A_{ji} associa uma função de junção j_{k_i} para cada *transição* t_{k_i} . A função de junção j_{k_i} determina o valor das variáveis X_i após o disparo da *transição*, $X(\theta^-) = j_{k_i}[X_i(\theta^+)]$ onde θ^-, θ^+ são os instantes de tempos imediatamente anterior e posterior ao disparo da *transição* t_{k_i} .
 - A_{fi} associa um sistema de equações f_{k_i} com cada *lugar* p_{k_i} , onde f_{k_i} é um conjunto de equações diferenciais e/ou algébricas. As variáveis de f_{k_i} são os elementos X_{pk_i} e os argumentos de entrada são os elementos X_i .
- M_{0_i} é a *marcação* inicial da subRdP PTD-OO.

3.3 Metodologia PFS → RdP PTD-OO

Este estudo inicialmente considera a metodologia apresentada em VILLANI *et al.* (2007) para modelagem de sistemas híbridos empregando RdP PTD-OO. Esta metodologia é estruturada nos seguintes passos:

- **Passo 1 – modelagem do fluxo de itens (materiais ou informações) em PFS:** aqui devem ser identificadas todas as macro-atividades associadas às funcionalidades do sistema e os processos envolvidos, isto é, os relacionamentos entre estas atividades. Isto acarreta também na definição dos limites do sistema a ser modelado.
- **Passo 2 – Especificação dos Casos de uso:** aqui identificam-se os elementos externos (atores) do sistema e a interação destes com o sistema usando um diagrama de Casos de uso.
- **Passo 3 – Elaboração dos diagramas de atividades:** aqui se detalham cada um dos casos especificados no passo 2 via um ordenamento de ações para completar (realizar) cada atividade.
- **Passo 4 – Especificação das classes e dos objetos:** com base nas informações levantadas nos passos 1 e 2, são definidas as classes e suas instâncias, isto é, seus objetos.
- **Passo 5 – Elaboração do diagrama de sequência e/ou de colaboração:** neste passo se explicita o relacionamento entre os objetos (especificados no passo anterior) para os Casos de uso do sistema (caracterizados no passo 2).
- **Passo 6 – Construção das classes em RdP PTD-OO e o diagrama de classes:** neste passo utiliza-se as informações dos diagramas elaborados nos passos 1, 3 e 5 para desenvolver um modelo em RdP PTD-OO para uma das classes especificadas no passo 4.
- **Passo 7 – Verificação da consistência entre modelos:** neste passo os modelos em RdP PTD-OO gerados no passo 6 são analisados do ponto de vista estrutural e funcional (via simulação de cenários) para verificar sua consistência com os diagramas dos passos 3 e 5.

Esta metodologia conforme apresentada em VILLANI *et al.* (2007) é relativamente genérica e não está diretamente relacionada a sistemas de submarinos, de modo que se deve considerar adaptações e interpretações para o presente caso. Adotando como foco na especificação e validação de um modelo consistente com os requisitos exigidos do sistema de propulsão e de eletricidade do submarino, as mudanças são introduzidas são a seguir apresentadas.

3.3.1 Metodologia adotada

A metodologia, originalmente apresentada por VILLANI (2004), foi revisada e modificada a fim de atender às necessidades específicas da análise de sistemas de um submarino convencional.

A primeira mudança é a alteração na sequência dos passos para construção e verificação do modelo, a segunda remete a um novo entendimento sobre como alguns dos passos devem ser executados.

A sequência original das etapas previa que o desenvolvimento dos diagramas de atividades precedia a especificação das classes e objetos. De modo que necessariamente depois do passo 4 era necessária uma revisão do passo 3 para assegurar a consistência entre as classes e objetos (passo 4) e os diagramas de atividades (passo 3). Entretanto, a definição das classes e objetos independem *a priori* dos diagramas de atividades. A determinação das classes e objetos deriva das características inerentes das atividades envolvidas na realização das funcionalidades do sistema, seus componentes e recursos. Assim, aqui se adota uma inversão entre o passo 3 e o passo 4.

Da forma como a metodologia é estruturada, ao final de cada passo é possível retomar qualquer um dos passos anteriores, mas ao voltar do passo 5 para o passo 2, entende-se que se deve executar novamente todos os passos entre o passo 2 até o 5. Entretanto, nem sempre isso é imperioso de modo que é válido identificar quais passos devem necessariamente ser revistos em função do problema a ser tratado. Cita-se aqui os exemplos a seguir:

Exemplo 1. No passo 5 pode ser identificada uma inconsistência na sequência das interações entre objetos, derivado de algum problema não identificado anteriormente entre os diagramas de atividades e as classes e objetos. Duas

situações são possíveis, uma onde há uma definição equivocada das classes sendo obrigatória uma reavaliação delas e *possivelmente* uma revisão apenas nos diagramas de atividades. A outra situação é a existência de um ordenamento equivocado de ações no detalhamento funcional das atividades considerando as classes pré-definidas e neste caso, apenas uma revisão nos diagramas de atividades é necessária.

Exemplo 2. Dada uma inconsistência observada apenas no passo 5, e que foi derivada de uma formulação incorreta de classes ou de algum diagrama de atividades resultante de uma concepção inadequada do sistema já na elaboração do modelo em PFS ou nos Casos de uso. É necessária assim uma revisão completa desde os passos iniciais da metodologia. Supondo que é realizada uma revisão no modelo em PFS, é necessário percorrer todos os passos novamente, verificando se há alterações nas classes e as repercussões das mudanças nos diagramas de atividades.

Com base nisso, a nova metodologia adotada também considera que no passo relacionado com a elaboração dos diagramas de atividades devem ser desenvolvidos necessariamente os diagramas para cada Caso de uso e também os diagramas detalhados de todas as atividades. Desta forma, as decisões no passo 5 ficam mais direcionados e efetivos, pois os diagramas de sequência ou de colaboração são derivados das interações entre objetos e estas interações estão diretamente associadas aos métodos existentes para cada classe.

Portanto, a metodologia adotada no presente trabalho tem os seguintes passos que devem ser executados de acordo com o fluxograma da Figura 3.12:

- **Passo 1:** Identificação dos processos que definem as funcionalidades do sistema - usando como técnica de modelagem o PFS;
- **Passo 2:** Identificação dos elementos externos (atores) e a interação destes com as funcionalidades do sistema – usando como técnica de descrição o diagrama de Casos de uso;
- **Passo 3:** Especificação das classes e os objetos de acordo com as informações anteriormente levantadas;

- **Passo 4:** Detalhamento do ordenamento de ações para a execução/realização das atividades de acordo com as classes e objetos identificados nos passos anteriores - usando como técnica de descrição fluxogramas (diagrama de atividades);
- **Passo 5:** Levantamento da sequência temporal das interações entre os objetos do sistema – usando como técnica de descrição o diagrama de sequência ou de colaboração;
- **Passo 6:** Detalhamento funcional das classes – usando como técnica de modelagem a RdP PTD-OO;
- **Passo 7:** Verificação da consistência entre modelos que representam o funcionamento do sistema como um todo. Caso necessário, deve-se retornar ao passo 3 e 4 para reavaliação das atividades e especificação das classes.

Figura 3.12 – Fluxograma com a sequência de passos da metodologia adotada

Fonte: elaborado pelo autor.

4 Modelagem do Sistema de Propulsão e de Eletricidade

Neste capítulo é apresentada a modelagem dos sistemas de propulsão e de eletricidade, para análise de soluções durante a fase de “Projeto Preliminar” de um submarino convencional. A definição de um modelo adequado contribui para as definições globais do navio, permitindo estimar com maior precisão o impacto de eventos ou mesmo de variações no perfil operacional sobre o submarino.

Como exemplo de contribuição direta de um modelo completo está a maior compreensão por parte dos projetistas da estrutura integrada do submarino, dispondo de uma visão dos sistemas de propulsão, eletricidade e de controle da plataforma. Além disso, um modelo de partes fundamentais do submarino durante o projeto preliminar provê subsídios para estudos mais detalhados na forma de simulações, permitindo com estudos a respeito da quantidade de elementos de bateria, do volume de combustível necessário para uma missão, do dimensionamento do motor elétrico de propulsão e da influência dos perfis operacionais possam ser discutidos na fase preliminar

4.1 Passo 1: Identificação dos processos em PFS

Para identificar os processos e os componentes do sistema de propulsão do submarino, é importante compreender a operação do submarino como um todo e quais atividades ele desenvolve. Desta forma, adota-se aqui uma abordagem sistemática e organizada, isto é, utiliza-se a técnica do PFS (Miyagi 1996) para descrever as funcionalidades (fluxo de itens materiais e não materiais envolvidos nas atividades executadas) do sistema de propulsão e de eletricidade do submarino. Considera-se assim em um nível mais elevado de abstração o comportamento do submarino, constituído essencialmente de três macro atividades:

- **[Partida Porto]:** esta primeira macro atividade tem por finalidade representar todas as operações realizadas pelo sistema de propulsão e de eletricidade quando o submarino ainda se encontra no cais até saída efetiva do porto. Nesta atividade estão inclusos os intertravamentos de partida, de sequência e de evolução dos processos.

- **[Navegação]:** esta macro atividade representa o submarino em operação de deslocamento, incluindo os cenários operacionais nos quais se deseja empregar o submarino efetivamente. Nesta macro atividade são considerados os intertravamentos de sequência e de evolução dos processos que asseguram a segurança da operação.
- **[Chegada Porto]:** esta macro atividade representa todas as operações do sistema de propulsão e de eletricidade do submarino quando da chegada ao porto, compreendendo o conjunto de ações necessárias que devem ser realizadas até a total parada de máquinas e, conseqüente, término de sua missão.

Estas atividades são representadas no modelo em PFS da Figura 4.1.

Ao fornecer uma visão macro e simplificada da operação do submarino como um todo, é possível iniciar o seu detalhamento, em uma abordagem *top-down* conforme segue.

4.1.1 Partida Porto

Ao suspender¹⁷ o submarino, cada sistema de bordo deve iniciar um conjunto de atividades para fins de verificar a disponibilidade dos recursos envolvidos e empreender as ações necessárias para a desconexão de recursos auxiliares de terra (energia, água, telecomunicações e demais serviços fornecidos pelo porto ou base). A atividade de **[Partida Porto]**, da Figura 4.1, é detalhada na Figura 4.2.

¹⁷ Na terminologia naval, suspender um submarino significa dar início as suas operações.

Figura 4.2 – Modelo em PFS do detalhamento da atividade **[Partida Porto]**

Fonte: elaborado pelo autor.

As atividades elencadas na Figura 4.2 são:

- **[Desconexão Energia Terra]:** nesta atividade ocorre a transferência do fornecimento de energia elétrica externa para o funcionamento apenas pelas baterias do próprio submarino. Esta atividade assume que a fonte energia de terra e as baterias do submarino funcionem certo tempo em paralelo e após a desconexão somente as baterias passam a ser as fontes de energia.
- **[Quadro Modo 1]:** nesta atividade a propulsão é ajustada para seu “modo 1” de operação, onde o submarino opera com as baterias conectadas aos conversores do MEP (Motor Elétrico de Propulsão) nos menores níveis de tensão e corrente visando economia de energia das baterias. Durante a atividade de navegação, são previstos mais dois outros modos de propulsão.
- **[Partida Resfriamento]:** nesta atividade, os subsistemas da plataforma encarregados de fornecer água refrigerada para todos os outros sistemas são acionados.
- **[Distribuição CA]:** nesta atividade todos os conversores da rede elétrica de corrente alternada (CA) do submarino são acionados.
- **[Partida MEP]:** esta atividade compreende todas as ações para início da operação do MEP, incluindo: circulação de lubrificante pelos mancais, alimentação dos conversores elétricos, circulação de água de resfriamento nos conversores e nos motores e confirmação de disponibilidade dos conversores após autoteste.
- **[Saída Porto]:** nesta atividade, o MEP é acionado para o deslocamento do submarino em consonância com as “regras de navegação restrita” em função de estar no porto ou ainda próximo a ele. O submarino permanece nesta atividade enquanto estiver nas proximidades do porto. Quando estiver fora da região

portuária, o submarino termina a atividade de **[Partida Porto]** e ingressa na atividade de **[Navegação]**.

4.1.2 Chegada Porto

O término de uma missão do submarino caracteriza-se pela aproximação deste a um porto ou uma base na qual ele encerra suas operações. As ações empreendidas nesta atividade voltam-se à preparação do submarino para parada dos sistemas de bordo, incluindo o sistema de propulsão. A conclusão do processo é caracterizada pela conexão da energia de terra ao submarino e suspensão de resfriamento para o sistema de propulsão. A Figura 4.3 detalha a atividade de **[Chegada Porto]**.

Fonte: elaborada pelo autor.

As atividades apresentadas na Figura 4.3 são descritas a seguir:

- **[Retorno Porto]:** ao se aproximar do porto ou base, o submarino deve cumprir com “regras de navegação restrita” atendendo a valores específicos de velocidade e sujeitando-se às regras da administração portuária. O submarino permanece nesta atividade até que a manobra de fundeio¹⁸ esteja completa.
- **[Parada MEP]:** esta atividade tem início logo que a manobra de fundeio é concluída, com as ações para a parada do MEP e seus conversores.
- **[Parada Resfriamento]:** esta atividade refere-se apenas à interrupção do resfriamento do sistema de propulsão. O sistema de resfriamento continua atendendo o sistema de ar condicionado e outros auxiliares.
- **[Conexão Energia Terra]:** nesta atividade são realizadas as ações para conexão do submarino não só com a fonte de energia de terra, mas com sistemas de comunicações e de água gelada para atendimento dos sistemas auxiliares. O submarino conclui esta atividade quando a conexão com todas as linhas de terra

¹⁸ Operação para lançamento da âncora visando inibir o deslocamento do submarino.

(de energia, de comunicações, de resfriamentos etc.) estão efetivamente realizadas.

- **[Quadro Energia Terra]:** esta atividade representa a situação onde o submarino emprega todos os sistemas de suporte de terra e não mais se encontra em condição autônoma. Indica o término da missão.

4.1.3 Navegação

É durante a atividade de **[Navegação]** que o submarino cumpre seus objetivos de deslocamento/movimentação desenvolvendo as tarefas que envolvam a propulsão conforme perfil operacional especificado pelo cliente. Diferentemente das atividades de **[Partida Porto]** e **[Chegada Porto]**, onde nelas o submarino funciona seguindo um conjunto de regras e intertravamentos para cumprir sequências pré-definidas e medidas de segurança específicas ao ambiente da “navegação restrita”. O problema de chaveamento entre sub-atividades é mais intenso na atividade de **[Navegação]**. A descrição desta atividade em condições normais¹⁹ é apresentada na Figura 4.4. A atividade de **[Navegação]** é iniciada quando o submarino já passou pela atividade de **[Saída Porto]**.

- **[Navegação Superfície]**²⁰: nesta atividade o submarino realiza os procedimentos para dar início a propulsão de superfície conforme perfil operacional definido pelo cliente. É a atividade que o submarino realiza após sair da condição de “navegação restrita” ou após “emergir”.
- **[Resfriamento Mínimo]:** nesta atividade é ajustado o nível de resfriamento definido como “mínimo” para o sistema de propulsão. Dado que o foco deste estudo está restrito aos sistemas de propulsão e eletricidade, considera-se aqui que todas as mudanças na “carga hotel” está contempladas nesta atividade. Nesta atividade, portanto, considera-se que a “carga hotel” opera inicialmente

¹⁹ Considera-se como condição normal, a situação na qual todos os equipamentos do submarino operam sem falhas.

²⁰ Neste trabalho, considera-se “Navegação na superfície” tanto o deslocamento efetivamente na superfície do mar como quando mergulhado até a cota periscópica.

em uma situação de baixo consumo energético (aproximadamente entre 10% a 20% da carga máxima).

- **[Resfriamento Médio]:** nesta atividade é ajustado o nível de resfriamento definido como “médio” para o sistema de propulsão. Nesta atividade, considera-se que a carga hotel opera em uma situação de consumo energético mediano (aproximadamente entre 20% e 80% da carga máxima).
- **[Resfriamento Máximo]:** nesta atividade é ajustado o nível de resfriamento definido como “máximo” para o sistema de propulsão. Nesta atividade considera-se que a carga hotel opera em uma situação de consumo energético elevado (aproximadamente entre 80% e 100% da carga máxima).
- **[Quadro Modo 1]:** atividade descrita na seção 4.1.1, refere-se à alimentação dos conversores do MEP nos menores níveis de tensão e corrente visando economizar energia das baterias.
- **[Quadro Modo 2]:** nesta atividade, o quadro da propulsão é ajustado para fornecer maiores níveis de tensão, mas com menores níveis de corrente aos conversores do MEP, para manter velocidades usuais de operação normal.
- **[Quadro Modo 3]:** nesta atividade, o quadro da propulsão é ajustado para fornecer maiores níveis de tensão e de corrente aos conversores do MEP, possibilitando que o submarino atinja a velocidade máxima.
- **[Velocidade Superfície]:** nesta atividade o submarino encontra-se na superfície e opera em velocidade dentro do perfil operacional previsto para superfície. Esta condição pode envolver uma ampla faixa de velocidades e de consumo da “carga hotel”. A partir desta atividade, o submarino pode passar para a atividade de **[Mergulhar]**, **[Navegação Restrita]**, **[Carga das Baterias]** ou **[Chegada Porto]**.
- **[Navegação Restrita]:** esta atividade é acionada quando o submarino se aproxima de uma região com restrições à navegação, exigindo uma postura de deslocamento compatível com as regras portuárias.
- **[Mergulhar]:** nesta atividade o submarino inicia o procedimento de mergulho, embarcando água nos tanques de lastros. O consumo da “carga hotel” durante esta atividade é diferenciado, pois quando está submerso se requerer o emprego das bombas para controle e ajuste da quantidade de água a ser

acrescidas no tanque de lastro. O submarino executa esta atividade até que atinja a cota de profundidade especificada. O submarino retorna a esta atividade sempre que for necessário executar um novo comando de velocidade ou para ajustar a cota em que se encontra.

Figura 4.4—Modelo em PFS do detalhamento da atividade de [Navegação]

Fonte: Elaborado pelo autor.

- **[Comando de Velocidade 1]:** esta atividade representa a escolha da operação desejada de velocidade em nível 1. A decisão de um comando ou outro está diretamente relacionado ao cenário operacional e seu contexto.
- **[Comando de Velocidade 2]:** esta atividade representa a escolha da operação desejada de velocidade em nível 2. A decisão de um comando ou outro está diretamente relacionado ao cenário operacional e seu contexto.
- **[Comando de Velocidade 3]:** esta atividade representa a escolha da operação desejada de velocidade em nível 3. A decisão de um comando ou outro está diretamente relacionado ao cenário operacional e seu contexto.
- **[Comando Parada]:** esta atividade representa a escolha da operação de parada do MEP. A decisão de um comando ou outro está diretamente relacionado ao cenário operacional e seu contexto.
- **[Velocidade 1]:** esta atividade representa o submarino executando a tarefa conforme designado previamente em sua missão na faixa de até 25% de sua velocidade máxima. Eventualmente, em função de particularidades da operação, pode-se ter um novo comando, conduzindo o submarino à atividade de **[Mergulhar]**. Alternativamente, pode-se conduzir o submarino para a atividade de **[Emergir]**.
- **[Velocidade 2]:** esta atividade o submarino executando a tarefa conforme designado previamente em sua missão na faixa 25% a 60% de sua velocidade máxima. Eventualmente, em função de particularidades da operação, pode-se ter um novo comando, conduzindo o submarino à atividade de **[Mergulhar]**. Alternativamente, pode-se conduzir o submarino para a atividade de **[Emergir]**.
- **[Velocidade 3]:** esta atividade representa o submarino executando a tarefa conforme designado previamente em sua missão na faixa de 60% a 100% de sua velocidade máxima, esta atividade envolve um alto consumo energético para as baterias. Eventualmente, em função de particularidades da operação, pode-se ter um novo comando, conduzindo o submarino à atividade de **[Mergulhar]**. Alternativamente, pode-se conduzir o submarino para a atividade de **[Emergir]**.

- **[Parado]:** esta atividade representa o submarino sem movimentação. Nesta situação, o submarino mantém os MEP desligados, aguardando por novos comandos.
- **[Carga Baixa Baterias]:** esta atividade realizada somente com o submarino na superfície ou mergulhado até a cota periscópica. Nela, o submarino inicia a partida dos sistemas auxiliares dos geradores diesel, incluindo içamento dos mastros²¹, e ajusta a velocidade do submarino para padrões pré-definidos a fim de garantir a carga das baterias com a maior eficiência do conjunto diesel-gerador.
- **[Partida Diesel]:** nesta atividade são verificadas se as condições mínimas e os requisitos de segurança para a partida dos grupos diesel geradores atendem aos requisitos de segurança.
- **[Carregamento]:** esta atividade transcorre até que as baterias estejam carregadas em um nível seguro para mergulho. As baterias são tipicamente carregadas até que atinjam o ponto de carga máxima, entretanto, isto pode ser revisado para o nível de carga que se considera adequado. Enquanto estiver nesta condição, a faixa de velocidade é considerada “restrita” e os critérios de peso e estabilidade do submarino devem ser considerados, embarcando água nos tanques de combustível de forma a estabilizar o submarino.
- **[Parada Diesel]:** ao término da atividade de carga, os grupos diesel-geradores são desligados e os mastros referentes são recolhidos. O submarino permanece nesta atividade enquanto existem potenciais riscos para imersão ou navegação com velocidade de superfície.
- **[Emergir]:** Esta atividade conduz o submarino à superfície do mar removendo água dos tanques de lastro. O submarino permanece nesta atividade até que atinja seu objetivo que varia entre a cota periscópica e a superfície do mar.

²¹ A ação de içamento dos mastros refere-se ao ato literal de expor os sistemas de exaustão de gases da queima de combustível e de aspiração de oxigênio ao ambiente externo do submarino. A ação contrária, realizada quando da parada dos geradores diesel envolve recolher os mastros.

Além destas atividades, o submarino também desenvolve outras afetas à segurança da tripulação, como procedimentos de emergência relacionados à integridade estrutural, à operação do submarino ou às condições de navegação. Comandos de emergência podem partir de qualquer atividade e possuem caráter prioritário sobrepondo-se as atividades elencadas na Figura 4.4. Por exemplo, em uma condição de emergência, pode-se ignorar avisos de carga baixa de baterias e decidir por aumentar a velocidade do submarino, apesar de isso acelerar a deterioração do nível de carga e colocando, inclusive, em risco a integridade do meio e da sua tripulação.

4.2 Passo 2: Identificação de atores externos e interação destes com o sistema de uso

As atividades de **[Partida Porto]** e **[Chegada Porto]** representam as ações necessárias para que o navio saia e retorne de forma segura ao porto, respectivamente. Estas atividades envolvem ações relacionadas a intertravamentos para inicialização ou término da operação do submarino. Aqui também de acordo com o escopo do estudo (no contexto do “Projeto Preliminar”) se considera o que ocorre na maior parte do tempo de uma missão empreendida durante a atividade de **[Navegação]**, de modo que o respectivo diagrama de Casos de uso é obtido ao analisar a operação por meio do modelo em PFS elaborado até o momento.

A Figura 4.5 ilustra as principais interações entre os sistemas de Propulsão e de Eletricidade e os atores externos. As ações afetas ao operador de propulsão remetem a comandos específicos para o controle do MEP, enquanto ao operador de eletricidade compete o gerenciamento das fontes de energia – incluindo a solicitação para emersão para acionamento do grupo diesel-gerador – e ao supervisor as ações para comandar a imersão ou emersão do submarino. Além disso, algumas das ações somente estão disponíveis quando o navio se encontra submerso ou na superfície. Esta diferenciação visa destacar que os operadores possuem conjuntos distintos de opções de operação de acordo com os estados operacionais do submarino identificados no modelo em PFS apresentado na seção 4.1.

Figura 4.5 – Diagrama de Casos de Uso relacionado com a atividade de [Navegação].

Fonte: elaborado pelo autor.

Para o submarino, em especial, o sistema de propulsão e eletricidade em análise neste trabalho, adota-se uma estrutura de três atores envolvidos: o operador de propulsão, o operador de eletricidade e o supervisor. Estes atores detêm atribuições distintas e interagem com os equipamentos do sistema de acordo com sua área de expertise: o operador de propulsão é encarregado de ajustar a velocidade do submarino conforme o ponto indicado pelo comandante, o operador de eletricidade é o responsável por monitorar as condições das baterias (níveis de carga e de tensão) e dos diesel geradores (quantidade de combustível, ponto de operação) e, o supervisor é responsável por averiguar o trabalho dos subalternos – os dois operadores – e é quem tem autonomia para comandar imersão ou emergência do submarino.

Cabe destacar que diferentes abordagens operacionais podem envolver mais ou menos atores (pessoas engajadas): empregando um operador e um supervisor, apenas dois operadores ou apenas uma única pessoa encarregada por todo o sistema de energia (propulsão mais eletricidade). Embora estas definições variem conforme a classe de submarino, o diagrama de Casos de uso não se modifica, apenas a responsabilidade é transferida de um indivíduo para outro.

4.3 Passo 3: Especificação das Classes e Objetos

Neste passo se especifica quais classes e objetos (*instâncias das classes*) compõem o sistema de propulsão e de eletricidade do submarino convencional, resumidamente busca-se representar aqui o sistema de supervisão e controle dos processos do sistema de propulsão e de eletricidade conforme as premissas e requisitos impostos a estes sistemas, considerando o diagrama de Casos de uso e o modelo em PFS produzidos anteriormente.

Para a especificação dos objetos, se considera as regras de decomposição adotadas por VILLANI (2004), onde se sugere determinar os objetos conforme as interações entre as partes/parâmetro (sejam contínuas ou discretas) e o período de tempo a qual estão restritas estas interações. Conforme a referência adotada, as três regras podem ser descritas como:

Primeira regra de decomposição: os objetos resultantes da decomposição do sistema devem ter apenas interações discretas em si, o que significa que os modelos em Rd PPTD-OO não compartilharão variáveis contínuas.

Segunda regra de decomposição: os objetos resultantes da decomposição podem ter interações contínuas entre si, porém restritas a um período limitado e que não seja em malha fechada.

Terceira regra de decomposição: os objetos resultantes da decomposição podem ter interações contínuas entre si, porém não limitadas a intervalos de tempo, entretanto não podem compartilhar variáveis contínuas em malha fechada.

Com base nas três regras de decomposição, considerando o modelo em PFS e o diagrama de Casos de uso é possível identificar os objetos que compõe o sistema. Tem-se assim a identificação de cada um dos objetos pertencentes ao sistema, considerando suas particularidades assim como a delimitação de até que ponto um objeto pode ser desmembrado em outros mais simples. De uma forma mais genérica, a primeira regra serve para identificar os objetos com base em uma visão sistêmica, o que resulta em objetos com interações discretas exclusivamente, porém compostos de diversos componentes contínuos. A segunda e a terceira regras permitem o desmembramento de objetos complexos em outros mais simples, até o ponto em que se obtêm objetos independentes entre si em termos de variáveis contínuas.

Para o presente caso, se considera o sistema de controle e supervisão do sistema de propulsão e de eletricidade, de modo que, com base nas premissas adotadas o estudo envolve o comportamento da carga de baterias frente a mudanças de velocidade e de operação submetidas ao sistema. Logo, duas variáveis contínuas são de interesse: o gasto de energia e a velocidade do submarino de modo que estas variáveis são os efetivamente considerados para aplicação das regras de decomposição anteriormente elencadas.

Ao aplicar a primeira regra de decomposição não se obtém nenhum objeto, pois todos os componentes do objeto controlado compartilham entre si variáveis contínuas. Consequentemente, deve-se aplicar a segunda regra de decomposição, onde nota-se que há interação por tempo limitado entre os diesel geradores e o restante do sistema de eletricidade. Entretanto, o objeto resultante é relativamente complexo e requer a aplicação da terceira regra, da qual é possível obter os demais objetos: bloco de propulsão (motor elétrico de propulsão, linha de eixo e propulsor), conversor do MEP, quadro elétrico de propulsão, carga hotel, baterias (composto pelo sistema de distribuição e as baterias propriamente ditas). Destaca-se que há um objeto por bordo do submarino, conforme explicado na seção 2.4, isso é decorrente da simetria entre os bordos e do fato de que suas operações são independentes entre si.

A terceira regra de decomposição impõe que os objetos resultantes não compartilhem entre si variáveis contínuas em malha fechada. Essa consideração implica que alguns componentes, os quais tradicionalmente são estudados de forma individualizada, estão aglutinados em um único objeto. Como são os casos das baterias e do bloco de propulsão.

As baterias são aqui vistas como concentradas em um único objeto, pois neste caso não há necessidade de considerar as atividades de chaveamento entre baterias e chaveamento para proteção de baterias e, nem o comportamento dinâmico do sistema de eletricidade, isto é, de acionamento de disjuntores e outros elementos de seccionamento de circuitos. Tampouco se necessita detalhar transitórios elétricos, os quais implicam no tratamento como objetos distintos a bateria e a rede de distribuição. Desconsideram-se as interações individuais de modo que se assume que as baterias (de modo conjunto) permanecem como fontes conectadas permanentemente à rede de distribuição.

O bloco de propulsão engloba o propulsor, a linha de eixo e os dispositivos/mecanismos que acionam o motor de propulsão, todos em um único objeto. Todos estes compartilham em malha fechada diferentes variáveis contínuas, tais como: tensão e resistência elétrica, energia mecânica na forma de rotação e energia mecânica na forma de empuxo. A representação do conjunto de propulsão como um único objeto, permite que a modelagem da integração casco-hélice seja feita de forma compacta considerando métodos consagrados na área.

No caso do sistema de controle supervisão, as interações do sistema de propulsão e de eletricidade com os diferentes atores (operadores de propulsão, de eletricidade e o supervisor) são feitas de forma discreta. Com base no diagrama de Casos de uso e considerando a primeira de regra de decomposição são definidos os objetos: ordem de velocidade 1, ordem de velocidade 2, ordem de velocidade 3, ordem de parada, ordem de velocidade superfície, solicitação de emersão, comando de imersão, comando de emersão, recarga das baterias e partida dos diesel geradores. Ao aplicar a segunda regra de decomposição ao sistema de controle supervisão verifica-se que apenas os objetos: interface DG (Diesel gerador) Boreste e interface DG (Diesel gerador) Bombordo apresentam trocas de informações contínuas por período limitado. Ao aplicar a terceira regra de decomposição, obtém-se os objetos: interface Carga Hotel e interface Baterias destacando que há ao menos dois objetos, um por bordo do navio e um objeto relacionado a interface MEP. Além disso, os operadores da propulsão e da elétrica bem como o supervisor interagem com o sistema por meio de ações discretas via interfaces próprias (de usuários), logo com base também na primeira regra de decomposição identifica-se os objetos: interface do operador da propulsão, interface do operador da elétrica e interface do supervisor. O objeto relativo ao sistema de controle e supervisão é identificado como sistema supervisor da propulsão.

Com base no apresentado, os diferentes objetos são a seguir agrupados de acordo com critérios de similaridade de funções, a fim de caracterizar as classes²² que são a seguir listadas:

²² Convencionou-se no documento que as classes são indicadas pela letra C e os objetos da forma O_{x,y} onde x representa o índice do objeto e y a que classe pertence. Exemplo: o objeto O_{1,8}

- *C₁ – Ordem*: O_{1.1} – ordem de velocidade 1, O_{2.1} – ordem de velocidade 2, O_{3.1} – ordem de velocidade 3, O_{4.1} – ordem de parada, O_{5.1} – ordem de velocidade superfície, O_{6.1} – recarga de baterias;
- *C₂ – Supervisório*: O_{1.2} – sistema supervisório de propulsão;
- *C₃ – Interface do usuário*: O_{1.3} – interface do usuário;
- *C₄ – Interface MEP*: O_{1.4} – interface MEP;
- *C₅ – Bloco de Propulsão*: O_{1.5} – bloco de propulsão;
- *C₆ – Interface Carga Hotel*: O_{1.6} – interface Carga Hotel boreste, O_{2.6} – interface Carga Hotel bombordo;
- *C₇ – Interface Diesel Gerador*: O_{1.7} – interface Diesel Gerador boreste, O_{2.7} – interface Diesel Gerador bombordo;
- *C₈ – Interface Quadro Elétrico*: O_{1.8} – interface QEP;
- *C₁₀ – Bateria e distribuição*: O_{1.10} – baterias de boreste, O_{2.10} – baterias de bombordo;
- *C₁₁ – Conversor*: O_{1.11} – conversor de boreste, O_{2.11} – conversor de bombordo;
- *C₁₂ – Carga Hotel*: O_{1.12} – carga hotel de boreste, O_{2.12} – carga hotel de bombordo;
- *C₁₃ – Diesel gerador*: O_{1.13} – diesel gerador de boreste, O_{2.13} – diesel gerador de bombordo;

Todos estes elementos são derivados das premissas adotadas e do modelo em PFS das atividades e funcionalidades do sistema e do diagrama de Casos de uso associado aos atores envolvidos e a interação destes com as funcionalidades do sistema de propulsão e de eletricidade do submarino.

4.4 Passo 4: Ordenamento das ações das Atividades

O diagrama de atividade é derivado como um refinamento do diagrama de Casos de uso (Villani 2004) e estruturado de acordo com os objetos e classes que foram

é o primeiro objeto da classe C₈. Além disso, buscou-se preservar a notação tradicional de embarcações para boreste e bombordo, isto é, para objetos referentes a componentes de boreste adota-se números ímpares e para aqueles de bombordo os pares.

especificados no passo anterior. A relação entre o diagrama de Casos de uso e o modelo em PFS também é considerado no ordenamento das ações das atividades. Assim com base no nos diagramas de atividades resultantes é possível efetuar a identificação dos métodos e atributos de cada uma das classes especificadas.

Neste texto, como uma amostra do que foi realizado, apresenta-se o diagrama de atividades (Figura 4.6) derivado da atividade de **[Navegação]**.

No modelo em PFS, explicita-se uma operação *cíclica*, onde os sistemas de propulsão e de eletricidade alternam suas operações em função de decisões dos operadores, como por exemplo: quando submergindo, alterando a velocidade submersa, solicitando emersão, etc.

Dado que o submarino é aqui visto como um sistema híbrido, havendo interações humanas simultâneas com a evolução de variáveis contínuas, adota-se um padrão de legenda para as atividades: as atividades representadas por um retângulo de traço contínuo indicam atividades discretas (atividades associadas a ocorrência de eventos que abruptamente alteram o valor de certos parâmetros); as representadas por retângulos tracejados indicam atividades contínuas (atividades associadas a variação contínua do valor de certos parâmetros); A atividade marcada por traço-ponto indica uma atividade híbrida (ex.: “*Operação Submersa*”) cujo detalhamento pode ser visualizado na Figura 4.7. Destaca-se que o contexto operacional, afeta os parâmetros e equações que regem os comportamentos contínuos dos sistemas envolvidos, isto é, quando se analisa o submarino na superfície ou submerso, se distingue claramente as atividades que ocorrem na superfície daquelas que acontecem quando do submarino em condição submersa. Além disso, embora seja possível organizar tudo em um único diagrama de atividades, a leitura e a extensão do diagrama resultante seriam de difícil interpretação da operação como um todo.

Alguns outros pontos/aspectos que se destacam são: a decisão de iniciar a recarga das baterias é acionada quando o nível de energia nas baterias é “menor que 30%” na superfície e “menor que 20%” quando submerso. Estes valores são assumidos como *arbitrários* e servem como um indicativo de que se deve considerar uma histerese para a recarga das baterias a fim de evitar que o modelo represente um comportamento irreal do submarino.

Figura 4.6 – Diagrama de atividade para a operação do submarino

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4.7 – Diagrama de atividades para a atividade *Operação Submersa*.

Fonte: elaborado pelo autor.

Também se considera que o submarino se mantém na superfície apenas quando é necessário. Isso é adotado a fim de garantir que as atividades submersas representam a condição normal do submarino e que o retorno à superfície só deve acontecer quando é necessário recarregar baterias ou quando alguma atividade não relacionada ao sistema de propulsão e de eletricidade deva ser executada mandatoriamente na superfície. Assume-se que o submarino executa atividades de comunicação rotineira na superfície do mar, contudo o cliente pode requerer que outras ações sejam executadas com frequências distintas.

Por fim, há uma atividade para monitorar/verificar o tempo máximo, quando o submarino está próximo do final de seu tempo de missão. Tecnicamente, neste momento, há o deslocamento para região portuária e consequente término da atividade **[Navegação]** e início da atividade **[Chegada Porto]**. A duração de uma missão é, também, uma informação do cliente para a equipe de projeto, este valor – normalmente expresso em dias – é empregado para estimar o tempo máximo que a atividade **[Navegação]** deve ser executada.

4.5 Passo 5: Levantamento da Sequência Temporal das Interações

Uma missão típica de um submarino compreende uma sequência de alterações de ordens e comandos: ordem de velocidade 1, ordem de velocidade 2, ordem de velocidade 3, ordem de parada, recarga de baterias, ordem de velocidade superfície, comando de imersão, comando de emersão e partida Diesel Gerador.

Cada ordem ou comando só pode ser dado em momentos específicos, de modo que o diagrama de sequência deve considerar diferentes caminhos, além disso, considerando o perfil cíclico inerente à operação do submarino, é necessário identificar pontos nos quais se entende que o ciclo de operação se “fecha”, isto é, quando a operação retoma o ponto inicial. Por exemplo, ao iniciar a atividade **[Navegação]** se entende que o submarino se encontra saindo do porto e com carga completa nas baterias. Este estado é considerado e indicado no diagrama de atividades da Figura 4.6 e no modelo em PFS, isto é, o submarino se encontra navegando na superfície e pode iniciar o procedimento para imersão.

Após a imersão, o operador pode enviar ordens de velocidade ou de parada para a propulsão a fim de que o submarino execute sua atividade fim. O submarino

permanece submerso enquanto a carga nas baterias estiver acima de 20% ou até que seja necessário retornar à superfície para executar a recarga das baterias e/ou alguma outra tarefa específica. Estando na superfície, pode lá permanecer até que termine a tarefa que demandou a sua emergência, seja ela recarga das baterias ou um período mínimo de navegação na superfície. Por fim, o submarino pode repetir este ciclo de operações até que finde seu tempo de missão.

Esta descrição sumarizada, baseada em operacionais do submarino identificados nos passos anteriores provê um maior conhecimento acerca de como o submarino funciona e o que dele é esperado em cada atividade. Com base nisso, é possível derivar um primeiro diagrama de sequência para a operação do submarino.

Devido à natureza cíclica da operação do submarino um único diagrama de sequência contemplando todas as variações do submarino compromete uma visão geral das funcionalidades. Desta forma, neste texto, o diagrama de sequência é segmentado entre estados nos quais o submarino permanece “muito tempo”²³: *navegação superfície* e *navegação submersa*.

Assim, apresenta-se a seguir 2 diagramas: um representando as ordens de velocidade e de emergência/imersão; e outro representando a operação de recarga das baterias. O primeiro descreve os passos necessários para executar as ordens de velocidade, imersão e emergência do navio, a Figura 4.8 apresenta este diagrama e a Tabela 2 apresenta a descrição de cada uma das comunicações entre os objetos. O segundo diagrama, por sua vez, descreve a operação de recarga de baterias. A Figura 4.9 apresenta este diagrama e a Tabela 3 apresenta as comunicações entre os objetos.

Tabela 2–Descrição das interações do diagrama de sequência da Figura 4.8.

Comunicação	Descrição	Tipo
0	C ₁₄ solicita nova ordem de velocidade para C ₂	Discreta
1	C ₂ envia nova ordem para C ₁	Discreta
2	C ₁ transmite nova configuração para C ₆ (bombordo)	Discreta
3	C ₁ transmite nova configuração para C ₆ (boreste)	Discreta
4	C ₁ transmite nova configuração para C ₈	Discreta

²³ Entende-se por “muito tempo” um período maior do que 20 vezes a constante de tempo mais lenta dentre todos os sistemas analisados. Tipicamente, em um submarino, a constante de tempo do conjunto casco-hélice está na ordem de dezenas de segundos, logo períodos maiores que 5 minutos são entendidos como “muito tempo”.

Comunicação	Descrição	Tipo
5	C ₆ (bombordo) comanda C ₁₂ (bombordo) de acordo com a ordem	Discreta
6	C ₆ (boreste) comanda C ₁₂ (boreste) de acordo com a ordem	Discreta
7	C ₈ comanda nova posição C ₉	Discreta
8	C ₈ informa nova posição a C ₁ .	Discreta
9	C ₁₂ (bombordo) consome energia de C ₁₀ (bombordo)	Contínua
10	C ₁₂ (boreste) consome energia de C ₁₀ (boreste)	Contínua
11	C ₉ consome energia de C ₁₀ (bombordo)	Contínua
12	C ₉ consome energia de C ₁₀ (boreste)	Contínua
13	C ₉ ajusta nível de tensão e limites de C ₁₁ (bombordo)	Contínua
14	C ₉ ajusta nível de tensão e limites de C ₁₁ (boreste)	Contínua
15	C ₁ envia ordem de velocidade para C ₄	Discreta
16	C ₄ envia ordem de velocidade para C ₁₁ (bombordo)	Discreta
17	C ₄ envia ordem de velocidade para C ₁₁ (boreste)	Discreta
18	C ₁₁ (bombordo) fornece tensão e corrente para C ₅	Contínua
19	C ₁₁ (boreste) fornece tensão e corrente para C ₅	Contínua
20	C ₅ retorna velocidade e rotação para C ₁₁ (bombordo)	Contínua
21	C ₅ retorna velocidade e rotação para C ₁₁ (boreste)	Contínua
22	C ₁₁ (bombordo) informa ordem cumprida a C ₄	Discreta
23	C ₁₁ (boreste) informa ordem cumprida a C ₄	Discreta
24	C ₄ informa que a ordem foi executada para C ₁	Discreta
25	C ₁₀ (bombordo) informa status de carga para C ₂	Contínua
26	C ₁₀ (boreste) informa status de carga para C ₂	Contínua
27	C ₁ informa cumprimento de ordem para C ₂	Discreta
28	C ₂ retorna ao usuário (C ₁₄) ordem cumprida	Discreta

Figura 4.8 – Diagrama de sequência para ordens de velocidade

Fonte: elaborado pelo autor.

Destaca-se que o diagrama da Figura 4.8 embora descreva de modo único ordens distintas (velocidade 1, 2 e 3, parada, emersão e imersão), há, de fato, algumas diferenças entre elas. Por exemplo, as ordens de emersão e imersão só são entendidas como concluídas quando o submarino atinge uma determinada profundidade, como aqui não é feita a modelagem da máquina do leme, assume-se que o navio leva um tempo pré-definido para concluir esse tipo de ordem após ter a respectiva ordem transmitida ao Bloco de Propulsão.

Para a operação de recarga, a fim de simplificar o diagrama, as ordens de velocidade não foram expandidas, pois, de fato, o submarino altera as configurações dos atuadores antes e depois da partida e da parada dos motores diesel. Como a recarga das baterias é uma operação comum na rotina operacional de um submarino convencional, a Figura 4.9 descreve somente as comunicações entre as classes Ordens, Interface Diesel, Diesel e Baterias. A execução das ordens de velocidade de recarga e de navegação em superfície ocorre antes da recarga e depois da recarga, respectivamente e seguem a sequência descrita na Figura 4.8.

Tabela 3 – Descrição das interações do diagrama de sequência da Figura 4.9.

Comunicação	Descrição	Tipo
1	C ₁₄ solicita nova ordem de velocidade para C ₂	Discreta
2	C ₂ aciona o <u>objeto</u> da <u>classe</u> C ₁ adequado (ordem de recarga)	Discreta
3	C ₁₀ (boreste) informa o novo nível de carga para C ₁	Contínua
4	C ₁₀ (bombordo) informa o novo nível de carga para C ₁	Contínua
5	C ₁ informa conclusão da ordem para C ₂	Discreta
6	C ₂ solicita partida dos Diesel para C ₇ (boreste)	Discreta
7	C ₂ solicita partida dos Diesel para C ₇ (bombordo)	Discreta
8	C ₇ (boreste) comanda partida de C ₁₃ (boreste)	Discreta
9	C ₇ (bombordo) comanda partida de C ₁₃ (bombordo)	Discreta
10	C ₁₃ (boreste) parte e informe C ₇ (boreste)	Discreta
11	C ₁₃ (bombordo) parte e informe C ₇ (bombordo)	Discreta
12	C ₁₃ (boreste) comanda conexão de C ₇ (boreste) a C ₁₀ (boreste)	Discreta
13	C ₁₃ (bombordo) comanda conexão de C ₇ (bombordo) a C ₁₀ (bombordo)	Discreta
14	C ₇ (boreste) fornece energia para C ₁₀ e C ₁₂ (boreste)	Contínua
15	C ₇ (bombordo) fornece energia para C ₁₀ e C ₁₂ (bombordo)	Contínua
16	C ₁₀ (boreste) informa que nível “carregado” atingido a C ₇ (boreste)	Contínua
17	C ₁₀ (bombordo) informa que nível “carregado” atingido a C ₇ (bombordo)	Contínua
18	C ₇ (boreste) comanda desligamento e parada de C ₁₃ (boreste)	Discreta
19	C ₇ (boreste) comanda desligamento e parada de C ₁₃ (boreste)	Discreta

Comunicação	Descrição	Tipo
20	C ₇ (boreste) informa fim da recarga de boreste para C ₂	Discreta
21	C ₇ (bombordo) informa da recarga de bombordo para C ₂	Discreta
22-25	Ordem de velocidade de superfície	Híbrida
26	C ₂ informa a C ₁ que as baterias estão recarregadas	Discreta

Figura 4.9 – Diagrama de sequência, operação de recarga das baterias

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Com base no diagrama da Figura 4.8, é possível estabelecer o diagrama de colaboração entre as classes, permitindo assim que se identifiquem as interfaces entre as classes e respectivos objetos, a Figura 4.10 apresenta este diagrama.

Figura 4.10 – Diagrama de colaboração para o diagrama de sequência da Figura 4.8.

Fonte: elaborado pelo autor.

O mesmo procedimento é realizado para desenvolver o diagrama de colaboração derivado do diagrama da Figura 4.9.

Uma vez que os diagramas de sequência e de colaboração estejam definidos e as comunicações entre os objetos identificadas, detalham-se as classes definidas anteriormente incluindo os métodos e atributos necessários. Ressalta-se que as classes são refinadas novamente na etapa posterior quando são desenvolvidos os modelos das classes em rede de Petri PTD-OO. A Figura 4.11 apresenta as classes com seus métodos e atributos identificados, os métodos indicados por um asterisco (*) são aqueles em que o usuário é o responsável pela sua execução. Todos os outros métodos advêm de interfaces entre as classes e seus respectivos objetos.

Figura 4.11 – Métodos e atributos das classes para o modelo do submarino

Fonte: elaborado pelo autor

Com as classes detalhadas e os diagramas de sequência, refina-se o diagrama de atividades para identificar fenômenos de sincronismos, paralelismos e a existência de conflitos entre os processos envolvidos. Quaisquer desvios em relação ao comportamento esperado dos sistemas indicam que os diagramas gerados devem ser revistos, sendo necessário refazer passos anteriores. A Figura 4.12 apresenta o diagrama de atividades resultante.

Figura 4.12 – Diagrama de atividades resultante

Fonte: elaborado pelo autor.

O diagrama da Figura 4.12 foca apenas o caso de mudança de velocidade, sendo que este mesmo diagrama de atividades pode ser interpretado para quaisquer ordens de velocidade, independentemente se o navio se encontra submerso ou não, sendo a distinção feita internamente na classe C₅ (Bloco de Propulsão) cujo conjunto de equações diferenciais é definido em função da profundidade.

O diagrama de atividades considerando todas as operações do submarino, como o descrito pelas Figura 4.6 e Figura 4.7, é relativamente extenso, pois inclui todas as ordens de velocidades (tanto as submersas como as de superfície), além do processo de recarga de baterias, onde há uma combinação de duas ordens de velocidade e a recarga das baterias por meio da operação dos conjuntos diesel-geradores.

4.6 Passo 6: Detalhamento funcional das Classes

Neste passo, o diagrama de atividades é utilizado para o detalhamento usando modelos em Rede de Petri PTD-OO de cada uma das classes, de maneira que os processos contínuos são convertidos em *lugares* e os processos discretos em *transições*.

Cada uma das classes e seus respectivos atributos e métodos são descritos nas próximas subseções. A organização delas considera a ordem que elas aparecem no diagrama de sequência do passo anterior. Desta forma, tem-se um paralelo entre os diagramas e as definições individuais de cada parte.

Nos diagramas das próximas subseções, adota-se como padrão que *transições* com preenchimento em branco representam métodos externos que são invocados por outras classes e que as *transições* preenchidas com preto são as que chamam métodos de outras classes. As *transições* mais estreitas com fundo preto são *transições* internas à classe e não invocam nada e nem são invocadas por outras classes.

4.6.1 C₁ - Ordem

A classe Ordem representa uma parte do sistema de controle e supervisão e tem por propósito coordenar a operação dos atuadores dada a decisão do usuário. Neste caso em particular, esta classe gerencia as modificações necessárias no QEP e na Carga Hotel do navio para que fiquem de acordo com o novo ponto de operação comandado pelo usuário.

Figura 4.13 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₁ - Ordem

C ₁ - Ordem
Externa: Rot4 Interna: ConfCH, ConfQEP, I1, I2, I3, I4
Métodos usados pela classe: T3_1 → T1_1.6: Comanda Interface CH (boreste) [ConfCH] T2_1 → T1_2.6: Comanda Interface CH (bombordo) [ConfCH] T4_1 → T1_3.8: Comanda Interface QEP [ConfQEP] T8_1 → T1_4.4: Comanda Interface MEP [Rot]
Métodos fornecidos pela classe: T6_1: Informa QEP alterado T9_1: Informa Ordem Cumprida

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.2 C₂ – Sistema Supervisório

Esta classe representa o sistema de controle e supervisão do navio de uma forma relativamente geral, onde se busca incorporar em uma única descrição a centralização das informações relevantes ao mesmo tempo em que executa as ordens em consonância com a decisão oriunda da classe C₁. A representação gráfica da classe é apresentada na Figura 4.14. A marcação inicial desta classe reflete o momento imediatamente anterior à saída do porto do navio, ao executar a *transição* T1_2, o navio encontra-se navegando na superfície com velocidade inicial S_0 e aguardando por uma nova ordem do operador.

A *transição* T2_2 só pode ser acionada quando o submarino está na superfície e o tempo limite já foi ultrapassado. Além disso, outros elementos não contidos nos modelos prévios são aqui incluídos, como o alarme de baixo nível de carga, sinal que serve para indicar ao operador que deve retornar à superfície e realizar o procedimento de recarga das baterias. Além disso, para desmembrar a ordem oriunda da classe C₃ um conjunto de funções de junção também é incluído a fim de garantir a devida execução da ordem.

Outro ponto importante considerado no modelo do Supervisório é que o alarme de aviso de baixo nível de carga nas baterias (Low_{flag}) está associado com o valor médio das cargas nas baterias, isto é, esta decisão considera que *a priori* não há desbalanço significativo de carga entre os bordos. Caso se tenha com desbalanço nas cargas o conjunto de equações que representam as cargas das baterias deve ser atualizado, bem como o critério de carga baixa.

O sistema de equações contido nesta classe refere-se à medição da carga atual das baterias, referência que é usada para disparar rotinas específicas: tais como a recarga de baterias ou retorno à superfície quando submerso.

Figura 4.14– Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C2 - Supervisorio

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.3 C3 – Interface do Usuário

A classe Interface de Usuário é empregada para tratar as entradas feitas pelo usuário, que no caso é o operador do sistema de propulsão. O usuário informa um valor de rotação desejada no eixo do motor, isto é, esta informação não é tratada nesta classe, porém é armazenada e enviada a outras classes. O principal objetivo desta classe é diferenciar as operações de emersão, imersão, recarga de baterias e de velocidade uma das outras, sem, no entanto, detalhar a operação de nenhuma delas. A Figura 4.15 apresenta os detalhes da classe.

Figura 4.15 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₃ – Interface do Usuário

Fonte: elaborado pelo

4.6.4 C₄ – Interface MEP

Esta classe representa a interface de controle de torque dos motores, convertendo a ordem de rotação do usuário em dois valores de torque distintos que devem ser traduzidos em corrente elétrica pelos Conversores do MEP. Esta classe pode ser também entendida como um *driver* de motor. A conversão da ordem de rotação em torque é feita com base em uma curva de carga do propulsor para diversas rotações, a definição do modelo matemático exato depende do tipo de estudo a ser realizado. A interface está apresentada em maiores detalhes na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₄ – Interface MEP

C ₄ - Interface MEP
Externa: Rot ₄ Interna: QMEP, l ₁ , l ₂ , l ₃ , l ₄
Métodos usados pela classe: T3_4 → T1_1.11: Comanda Conv (boreste) [QMEP/2] T4_4 → T1_1.2.11 Comanda Conv (bombordo) [QMEP/2] T3_4 → T1_1.3.1: Informa Ordem cumprida
Métodos fornecidos pela classe: T1_4: Recebe ordem de rotação T4_4: Velocidade atingida Conv BE T5_4: Velocidade atingida Conv BB
Sistema de Equações: $Q_{MEP} = f(Rot_4)$

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.5 C₅ – Bloco da Propulsão

Esta classe representa todo o conjunto de equipamentos da propulsão {MEPs, linha de eixo, hélice, casco} e o comportamento físico completo do sistema casco-hélice. O modelo desta classe em Rede de Petri PTD-OO possui dois *lugares* e duas *transições*, os *lugares* incluem o conjunto de equações diferenciais do sistema casco-hélice quando o submarino se encontra ou na superfície ou submerso e as *transições* se referem as modificações na profundidade afetam o sistema de equações.

O modelo matemático casco-hélice aqui adotado é simplificado, isto é, o modelo do motor é entendido como uma fonte de torque para a linha de eixo, que transmite o conjugado até o hélice que por sua vez o converte em empuxo que se traduz como deslocamento do navio. Cabe destacar que como a dinâmica deste conjunto de equações tem uma constante de tempo na ordem de minutos, a simplificação do motor como fonte de torque não influencia de forma relevante no resultado operacional. Além disso, considerando que o objetivo do modelo é fornecer dados para análises do “Projeto Preliminar”, a dinâmica da parte elétrica não é considerada relevante neste momento. As equações do torque e da velocidade do navio dependem de diversos parâmetros adimensionais como K_t , K_q e K_v , além de características físicas do propulsor, como o seu diâmetro. Em geral e na prática, os valores adimensionais são obtidos de forma empírica por meio de testes em modelos-livre ou empregando técnicas de simulação. O trabalho desenvolvido por Tonacio (2014) apresenta detalhes sobre as equações relacionados à integração casco-hélice e como são obtidos os parâmetros adimensionais, além de discorrer sobre o uso dos diagramas B-Troost, empregados como forma de representar um propulsor genérico.

A Figura 4.17 apresenta a classe em mais detalhes.

Figura 4.17 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₅ – Bloco da Propulsão

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.6 C₆ – Interface da Carga Hotel

Embora este estudo seja centrado na operação dos sistemas de propulsão e de eletricidade, os outros subsistemas do submarino permanecem influenciando os parâmetros da propulsão e da eletricidade. A interface da Carga Hotel é parte do sistema de controle e supervisão do navio que neste caso específico serve para considerar a variação dos parâmetros de controle de todas as outras cargas do navio. Tipicamente, para cada tipo de operação (emersão, imersão, recarga) e para cada nível de velocidade há um valor esperado da Carga Hotel, conseqüentemente é necessário representar esta variação. A Figura 4.18 apresenta os detalhes acerca desta classe.

Figura 4.18 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₆ – Interface da Carga Hotel

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.7 C₇ – Interface Diesel-Gerador

A interface dos grupos Diesel-Gerador faz parte do sistema de controle e supervisão do submarino e tem por objetivo coordenar a operação de partida e parada dos grupos Diesel-Gerador e de monitorar o andamento da tarefa de carregamento das baterias. Além disso, esta classe envolve o registro dos dados de consumo de combustível Diesel. A Figura 4.19 apresenta detalhes a respeito da classe, métodos e atributos.

Figura 4.19 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C7 – Interface Diesel Gerador

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.8 C8 – Interface do Quadro Elétrico da Propulsão

A operação dos sistemas de propulsão e de eletricidade em um submarino convencional é dependente da capacidade de fornecimento de corrente e tensão elétricas das baterias. A fim de garantir versatilidade e melhorar o desempenho, é possível rearranjar o QEP de forma que a tensão de alimentação de cada uma das armaduras do MEP seja oriunda: de cada bateria individualmente (modo 1 ou “independente”); das baterias em paralelo com maior capacidade de corrente (modo 2 ou “em paralelo”); ou das baterias em série com maior capacidade de tensão (modo 3 ou “em série”). Esta classe é responsável por gerir esta mudança. A Figura 4.20 apresenta os detalhes da classe.

Figura 4.20 – modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₈ – Interface QEP

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.9 C₉ – Quadro Elétrico da Propulsão

O QEP é responsável pelo chaveamento das baterias de forma a prover diferentes níveis de tensão e corrente para os conversores do MEP. Dado que esta classe que representa a conexão física entre o Bloco de Propulsão e Conversores com o sistema de eletricidade, é nesta classe que a potência consumida pelos motores é distribuída entre as baterias. A representação em rede de Petri PTD-OO está apresentada desta classe está na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₉ - QEP

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.10 C₁₀ – Bateria

Durante a etapa de definição das classes e objetos, a rede de distribuição de energia e as baterias foram amalgamadas em uma única classe. A Bateria é responsável pelo fornecimento de energia elétrica para todo o submarino durante sua operação, exceto quando as baterias são recarregadas.

Diferentemente de todas as outras classes, a definição da bateria como uma classe não é feita observando estritamente as três regras de decomposição, pois ela troca informações contínuas sem limite de tempo com diversos outros objetos, violando explicitamente a terceira regra de decomposição. Entretanto, o que ocorre no caso da Bateria é que sua operação é modificada pela atuação do grupo diesel gerador, que faz com que Bateria deixe de ser fornecedora e passe a ser consumidora de energia junto com as outras cargas durante o procedimento de recarga. Desta forma, há uma *descontinuidade* em seu comportamento físico, embora não deixe de compartilhar nenhuma variável com outros objetos, esta mudança torna a bateria um elemento caracterizável como classe. Além disso, por não trocar nenhuma informação discreta com outra classe (a bateria tem seus parâmetros monitorados pelo sistema de controle e supervisão, sem, no entanto, atuar neles diretamente), a classe de Bateria pode ser descrita via um modelo em Rede PTD. A definição dela como classe, modelando em Rede de Petri PTD-OO visa apenas uma uniformização de modelos para sua inclusão na descrição geral do sistema de propulsão e de eletricidade do submarino. A Figura 4.22 apresenta a Rede de Petri PTD-OO para a classe Bateria.

Figura 4.22 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₁₀ - Bateria

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.11 C₁₁ – Conversor

Esta classe faz parte dos equipamentos/dispositivos da propulsão e sua função é garantir que a ordem de torque recebida da classe C₄ seja cumprida e que este valor seja produzido pelo motor na linha de eixo. Nesta classe, é calculado o consumo elétrico efetivo do motor, pois o rendimento do conjunto {MEP, Conversores} depende de parâmetros físicos do motor e dos próprios conversores. Assim, esta classe é responsável por fornecer o consumo elétrico do MEP para o QEP, que por sua vez, transmite a informação à classe das baterias. Outro ponto a ser destacado, é em relação à eficiência do conjunto MP que na prática costuma ser mensurada de forma empírica ou obtida por meio de modelos que dependem da rotação atual do motor e de seu torque, visto que cada tipo de motor apresenta um comportamento próprio o que envolve também a verificação de qual o melhor modelo para esta representação.

A Figura 4.23 mostra os métodos, atributos e a Rede de Petri PTD-OO para este caso.

Figura 4.23 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₁₁ - Conversor

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.12 C₁₂ – Carga Hotel

A Carga Hotel, conforme apresentado na subseção sobre sua Interface, é uma representação do conjunto de todas as outras cargas do navio, tendo ela variações em função de diferentes níveis de velocidade, por exemplo. Como neste trabalho se assume que apenas os parâmetros de consumo elétrico da Carga Hotel são relevantes, esta classe consiste essencialmente de vetores que representam modelos matemáticos do consumo elétrico em diferentes pontos de operação do navio. A cada *transição* disparada, os parâmetros da função f_{CH} são alterados para representar a nova condição do navio. A escolha dos diferentes modelos de Carga Hotel está relacionada com os distintos tipos de cenários nos quais o submarino atua.

A Rede de Petri PTD-OO está apresentada na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO da classe C₁₂ – Carga Hotel

Fonte: elaborado pelo autor.

4.6.13 C₁₃ – Diesel-Geradores

O grupo de equipamentos para geração de energia elétrica do submarino tem como único objetivo carregar as baterias durante a operação do submarino. Um dos motivos de estudos do comportamento do navio ao longo de uma missão é a estimativa do consumo de combustível o qual é empregado para determinar o volume necessário de diesel que deve estar disponível em um submarino para que este cumpra sua missão.

A classe C₁₃ é composta apenas pelos ciclos de partida e parada comandados pela classe de interface. No modelo desta classe em Rede de Petri PTD-OO na Figura, 4.25, enquanto uma *marca* estiver no *lugar* P4_13, o subsistema produz energia suficiente para suprir as demandas do submarino e utilizar o excesso para recarga da Bateria. Entretanto, esta operação apresenta algumas limitações, a principal delas é que o nível de carga do grupo Diesel-Gerador fica limitado pelo atual nível de tensão da Bateria, isto é, do seu atual nível de carga. Consequentemente, quanto mais descarregada estiver a Bateria, menor será a eficiência do processo representado pela classe C₁₃. As equações associadas ao *lugar* P4_13 devem ser concebidas de forma a atenderem às curvas de consumo do motor Diesel em estudo, por exemplo. O desenvolvedor ao formular esta classe deve verificar quais tipos de motores diesel são os candidatos para o submarino em estudo e analisar o perfil individual de

consumo destes grupos geradores a fim de identificar corretamente o sistema de equações para $P_{DG}(t)$ e $Consumo(t)$.

Figura 4.25 – Modelo em Rede de Petri PTD-OO para a classe C₁₃ – Diesel Gerador

Fonte: elaborado pelo autor.

4.7 Passo 7: Verificação de Consistência dos Modelos

Após a elaboração dos modelos das classes, é necessário verificar se as funcionalidades descritas estão coerentes com os diagramas previamente elaborados. Neste caso, inicialmente se converte o diagrama de atividades para um modelo equivalente em Rede de Petri PTD-OO.

Conforme apresentado por Villani (2004), a conversão deve considerar se a atividade é contínua ou discreta, e ao final se identificam todos as *transições* e *lugares* dentre aqueles elencados no modelo em rede de Petri PTD-OO. A verificação de consistência tem por finalidade assegurar que o modelo não carrega consigo erros conceituais ou mesmo de premissas, os quais podem comprometer os resultados obtidos da análise destes modelos.

A Figura 4.26 apresenta o diagrama de atividades convertido em um modelo em rede de Petri PTD-OO empregando os *lugares* e *transições* das classes e objetos anteriormente especificados. A figura em questão apresenta uma ‘ordem de velocidade 1’, considerando que o navio encontrava-se operando com ‘velocidade 2’ anteriormente, ambas em condição submersa. Ressalta-se que todos os comandos de mudança de velocidade são similares e possuem apenas variações entre si em alguns dos métodos que são invocados por alguns dos objetos. Consequentemente se entende que ao analisar apenas um dos casos, os outros – por analogia – podem ser tratados da mesma maneira. Ao analisar o modelo resultante, percebe-se que todos os métodos descritos nos diagramas de sequência e nos modelos das classes aparecem na avaliação de consistência. Importante destacar que esta

análise indica que o modelo pode ser considerado como consistente e pode ser usado para a análise de diferentes situações via técnicas de simulação de cenários para fins de estudo na fase de “Projeto Preliminar” do navio.

Figura 4.26 – Verificação de consistência

Fonte: elaborado pelo autor.

Cada um dos elementos (*lugares* e *transições*) da rede de Petri PTD-OO da Figura 4.26, tem um equivalente nos modelos desenvolvidos no passo 6. Por exemplo, o *lugar* P2_10 da Figura 4.26 é o mesmo P2_10 da classe C₁₀ Baterias (Figura 4.22), bem como a *transição* T9_8 → T6_1 indica que o disparo da *transição* T9_8 (classe C₈ Interface QEP, Figura 4.20) leva ao disparo da *transição* T6_1 (classe C₁ Ordem, Figura 4.13).

5 Avaliação dos Resultados

Neste capítulo busca-se avaliar o modelo desenvolvido, verificando se este atende aos objetivos definidos e se seu comportamento é considerado plenamente satisfatório do ponto de vista operacional, isto é, se o modelo é efetivo para as finalidades previstas no “Projeto Preliminar” de um navio.

Realiza-se uma análise estrutural que discute se o modelo apresenta elementos consistentes com suas premissas, verificando se a maneira como está a modelagem é assertiva e representa claramente o que se espera de sistemas de propulsão e de eletricidade. A seguir se realiza uma análise funcional para confirmar o quanto o modelo se comporta como sua contraparte física, avaliando os resultados obtidos por cenários simulados em relação àqueles encontrados fisicamente.

5.1 Análise estrutural

Em uma arquitetura de propulsão *full-electric*, o sistema de propulsão e de eletricidade têm fundamentalmente as funções de gerar energia para todo o navio, propelir o submarino e garantir a operação deste mesmo quando submerso. Para executar estas funções, um submarino deve dispor de equipamentos e subsistemas, conforme apresentado no Capítulo 2. Existe assim um sistema de supervisão e controle capaz de monitorar e controlar todos os equipamentos necessários para consecução de seus objetivos. O modelo funcional de um submarino é assim um meio assim analisar o comportamento do submarino em operação e sob diferentes situações.

Aqui inicialmente se considera a parte de operação do submarino em mar aberto. Com base no modelo em PFS obtido (passo 1 da metodologia adotada), há um conjunto total de sete tipos de subatividades que o navio deve empreender enquanto estiver executando a atividade **[Navegação]**, consistindo de cinco ordens de velocidade (Parada, Velocidade 1, Velocidade 2, Velocidade 3, Velocidade de Superfície), duas ordens de mudança de profundidade (Imersão e Emersão) e uma ação de Recarga das baterias. Por conseguinte, algumas somente são executadas enquanto o submarino permanece na superfície ao passo que outras quando se encontra submerso.

Esta distinção é relevante, pois aborda elementos fundamentais da operação de submarinos convencionais: um rol de opções de navegação enquanto submerso composto por

diversas velocidades e um conjunto limitado de ordens na superfície que devem servir ou a propósitos tipicamente militares (comunicações, detecção, monitoramento e vigilância) ou a tarefas de continuação da operação (recarga de baterias, reposição de sistemas de oxigênio).

Além disso, dado que o objetivo do modelo é atender a propósitos de projeto (“Projeto Preliminar”), servindo como suporte à tomada de decisão pela autoridade de projeto, discussões acerca de situações excepcionais como travamento de lemes, colisão com outras embarcações, etc. não são exploradas neste primeiro momento. Pois, estão fora do escopo de um “Projeto Preliminar” cujo objetivo é estimar os componentes e equipamentos a fim de elaborar um primeiro banco de soluções candidatas as quais serão estudadas, então, com maior profundidade em outras etapas do projeto.

Para fins de análise estrutural do modelo cabe empreender esforços a fim de identificar se as propriedades de operacionabilidade (confirmação de atendimento às condições operacionais previstas) e de segurança (confirmação de que as condições operacionais estão sempre sob controle) estão presentes.

A primeira propriedade relativa a operacionabilidade se traduz num modelo em rede Petri PTD-OO na capacidade de a partir de um evento inicial e_0 atingir um outro evento final e_f (exemplo: quando o usuário seleciona uma nova ordem de velocidade, evento e_0 , a classe Interface MEP deve receber a nova ordem, evento e_f).

A segunda, de segurança, se traduz num modelo em rede Petri PTD-OO na confirmação de que um determinado estado, definido por meio de uma especificação parcial ou completa da *marcação* $m_{x,y}$ de um objeto $O_{x,y}$, nunca é alcançado (exemplo: considerando que a variável Low_{flag} da classe Supervisor é acionada, nenhuma nova ordem de velocidade submersa deve ser executada que não a de Emergência).

5.1.1 Análise dos modelos em RdP PTD-OO

O método de análise para modelos em RdP PTD-OO é apresentado por VILLANI *et al.* (2007), onde se detalha quais são as etapas envolvidas. As próximas subseções apresentam detalhes sobre cada etapa, com informações a respeito das considerações adotadas.

A análise aqui realizada considera inicialmente que o submarino se encontra na condição de submersa, com baterias recarregadas em nível superior ao mínimo exigido para retorno à superfície e que o operador seleciona uma nova velocidade compreendida na faixa da Velocidade 3.

Etapa 1 – Especificação da Declaração de Propriedade

Propriedade 1 – Quando o usuário escolhe o comando Velocidade 3 (evento e_o), o sistema de controle e supervisão inicia os processos necessários para consecução da ordem demandada (evento e_i) até que a ordem seja cumprida em sua integralidade (evento e_f).²⁴

e_o : disparo de T5_1.3

e_i : alcança marcação m1_2 = {P22_1.22}

e_f : disparo de T6_1.2

Etapa 2 – Especificação do Conjunto de Restrições

Restrição 1A: O nível das baterias é superior a 20% no período de $\theta_i \leq \theta \leq \theta_f$. Onde θ_i representa o tempo do evento inicial e_i , θ_f indica o tempo do evento final e θ é a variável tempo.

Restrição 2A: As transições T4_1.4 e T5_1.4 disparam em algum momento no período de $\theta_i \leq \theta \leq \theta_f$.

A restrição remonta a condição inicial do sistema: nível de carga das baterias, pois caso alguma das baterias apresente um valor inferior a 20%, é necessário retornar à superfície para recarga, impossibilitando a execução da ordem de “Velocidade 3”.

Etapa 3 – Construção do Diagrama de colaboração Estático

Alternativamente ao Diagrama de colaboração apresentado durante a modelagem do sistema de propulsão e de eletricidade do submarino, o diagrama de colaboração neste caso descreve somente as interações *possíveis* entre diferentes objetos. Desta forma, o diagrama apresentado na Figura 5.1, não possui indicação numérica da sequência de interações entre os objetos.

²⁴ Nesta subseção, adota-se como identificação no formato: ZX_I.C, onde Z representa o elemento da RdP em questão (T: *transição*, P: *lugar*), X indica o número indicativo daquele elemento (valor sequencial inteiro), I representa uma instância, um objeto, da classe C. Exemplo: T5_1.3 refere-se a *transição* T5 do primeiro objeto instanciado da classe C₃ (Interface com o Usuário).

Figura 5.1 – Diagrama de colaboração Estático

Fonte: elaborado pelo autor.

O primeiro passo para análise da Propriedade 1 consiste em avaliar o evento inicial representado pelo disparo de T5_1.3 (Interface Usuário) seguido do evento intermediário, disparo de T27_1.2 até que o evento final ocorra, disparo de T6_1.3. Consequentemente, ao menos estes três objetos, O_{1.3}, O_{1.2} e O_{8.1}, serão considerados nas próximas etapas, dois destes objetos estão relacionados diretamente às ações do Usuário, enquanto o objeto O_{8.1} é analisado devido à sua interação com o sistema de supervisão e controle (objeto O_{1.2}).

Etapa 4 – Análise do primeiro objeto

Etapa 4.1 – Análise da Dinâmica Discreta (O_{1.3} Interface Usuário)

Nesta primeira análise, é necessário construir um primeiro sequente com base nas condições iniciais e finais da propriedade 1.

Busca 1: considerando o modelo da classe C₃ (Interface Usuário) e nas premissas para a construção de sequentes apresentadas por VILLANI *et al.* (2007). Chega-se ao sequente: $\Gamma_0, P_{5.1.3}, !T_{5.1.3}, !T_{6.1.3} \vdash P_{4.1.3} \otimes \Gamma_f$. Onde $P_{5.1.3}$ é a condição posterior ao disparo de T5_1.3 e $P_{4.1.3}$ é a condição posterior ao disparo de T6_1.3, as quais são as *transições* cujos disparos representam o evento inicial e o evento final, respectivamente.

Por meio de lógica linear, a análise do sequente da Busca 1 na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Análise do sequente para a classe C_3 (Interface do Usuário)

$$\begin{array}{c}
 \Gamma_f = \emptyset \\
 \Gamma_0 = \emptyset \\
 \hline
 \frac{p_{6.1.3} \vdash p_{6.1.3} \quad p_{4.1.3}, !t_{5.1.3}, !t_{6.1.3} \vdash p_{4.1.3}}{\otimes L(t_{6.1.3})} \\
 \frac{p_{5.1.3} \vdash p_{5.1.3} \quad \Gamma_0, p_{6.1.3}, !t_{5.1.3}, !t_{6.1.3} \vdash M_F \otimes \Gamma_f}{\otimes L(t_{5.1.3})} \\
 \hline
 \Gamma_0, M_0, !t_{5.1.3}, !t_{6.1.3} \vdash M_F \otimes \Gamma_f
 \end{array}$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na análise realizada, é possível caracterizar apenas um único cenário de estudo, denominado doravante como Cenário 1, caracterizado como:

$$\text{Cenário 1: } T_{5.1.3}/T_{27.1.2}; T_{6.1.3}/T_{29.1.2}$$

Etapa 4.2 – Elaboração das Hipóteses para o objeto $O_{1.3}$ (Interface Usuário)

Hipótese 1A: O método chamado pelo objeto $O_{1.3}$ é imediatamente executado por $O_{1.2}:T_{5.1.3}/T_{27.1.2}$ que dispara em $\Delta\theta = 0$ assim que se torna habilitado em $O_{1.3}$.

Etapa 4.3 – Análise da Dinâmica Contínua objeto $O_{1.3}$ (Interface Usuário)

Quando $\theta_{6.1.3} \geq \theta_{5.1.3} + \varepsilon$, onde ε representa o tempo transcorrido até que todos os disparos ocorram. Além disso, $T_{27.1.2}$ ocorre com diferença de tempo de 0 segundos, considerando a Hipótese 1A.

Etapa 5a – Análise dos outros objetos

Etapa 5a.1 – Análise da Dinâmica Discreta ($O_{1.2}$ Sistema Supervisório)

Nesta etapa o foco é o objeto que faz interface direta com o objeto principal analisado. Nas buscas aqui definidas, entende-se que é uma continuação da análise iniciada no primeiro objeto. Como existem 2 *transições* de interface entre os objetos $O_{1.3}$ e $O_{1.2}$ e , são necessárias, portanto, 3 buscas distintas.

- Busca 1 (até o disparo de $T_{5.1.3}/T_{27.1.2}$): uma vez que o disparo desta *transição* não depende do objeto $O_{1.2}$, conforme estabelecido pela Hipótese 1A, esta busca não é feita.

- Busca 2 (a partir do disparo de $T_{5.1.3}/T_{27.1.2}$): o sequente é construído com *marcação* inicial igual a condição pós disparo de $T_{5.1.3}/T_{27.1.2}$, com *transições* no sequente que atinjam a condição do evento final $T_{6.1.3}$, a *marcação* final após o evento final não é estabelecida pela Propriedade 1, então é dita como sendo $M_f = \emptyset$. A análise deste sequente é apresentada na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Sequente para $O_{1.2}$ (Sistema Supervisório)

$$\begin{array}{c}
 \frac{P_{23.1.2} \vdash P_{23.1.2} \quad \Gamma_0, P_{13.1.2}, !T_{28.1.2}, !T_{29.1.2} \vdash \Gamma_f}{\Gamma_0, P_{22.1.2}, !T_{28.1.2}, !T_{29.1.2} \vdash \Gamma_f} \otimes L(T_{29.1.3}) \\
 \frac{P_{22.1.2} \vdash P_{22.1.2} \quad \Gamma_0, P_{22.1.2}, !T_{28.1.2}, !T_{29.1.2} \vdash \Gamma_f}{\Gamma_0, P_{22.1.2}, !T_{28.1.2}, !T_{29.1.2} \vdash \Gamma_f} \otimes L(T_{28.1.3})
 \end{array}$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, observa-se que $\Gamma_f = P_{13.1.2}$. Após isto, a busca é interrompida, pois não há mais *transições* habilitadas no sequente.

- Cenário 3 (após o disparo de $T_{6.1.3}/T_{29.1.2}$): o sequente para este caso é $\Gamma_0, P_{13.1.2}, !T_{28.1.2}, !T_{29.1.2} \vdash \Gamma_f$, como não há nenhuma *transição* habilitada, a busca encerra neste ponto com $\Gamma_f = P_{13.1.2}$.

Com base nas buscas, três cenários podem ser explorados:

- Cenário 1-1: $T_{5.1.3}/T_{27.1.2}; T_{28.1.2}/T_{1.8.1}; T_{6.1.3}/T_{29.1.2}$
- Cenário 1-2: $T_{5.1.3}/T_{27.1.2}; T_{28.1.2}/T_{1.8.1}$
- Cenário 1-3: $T_{5.1.3}/T_{27.1.2};$

Etapa 5a.2 – Elaboração de Hipóteses ($O_{1.2}$ Sistema Supervisório)

Hipótese 1B: A chamada de método do objeto $O_{1.2}$ é imediatamente executada pelo objeto $O_{8.1} : T_{28.1.2}/T_{1.8.1}$ dispara em $\Delta\theta = 0$ após estar habilitada em $O_{1.2}$.

Hipótese 1C: A chamada de método do objeto $O_{1.2}$ não é imediatamente executada pelo objeto $O_{1.3}$. Devendo aguardar um tempo $\Delta\theta \geq \varepsilon_1$ equivalente ao tempo necessário para consecução da ordem pelos atuadores.

Etapa 5a.3 – Elaboração da Análise Contínua ($O_{1.2}$ Sistema Supervisório)

Com base na Hipóteses 1B, o Cenário 1-3 é inconsistente, pois como a *transição* $T_{28.1.2}$ se encontra habilitada após o disparo de $T_{27.1.2}$ a condição imposta não é adequada. Por outro lado, a Hipótese 1C faz com que o cenário 1-2 também seja descartado, pois a despeito de existir uma condição para habilitação de $T_{29.1.2}$ o objeto não está travado, por consequência, somente o Cenário 1-1 permanece em análise.

Contudo, há uma *transição* de interface $T_{28.1.2}/T_{1.8.1}$ a qual demanda análise similar a esta para o objeto $O_{8.1}$.

Etapa 5b.1 – Análise da Dinâmica Discreta ($O_{8.1}$ Ordem)

Como existem 2 *transições* de interface entre os objetos $O_{8.1}$ e $O_{1.2}$, são necessárias, portanto, 3 buscas distintas.

- Busca 1 (até o disparo de $T_{28.1.2}/T_{1.8.1}$): uma vez que o disparo desta *transição* não depende do objeto $O_{8.1}$, conforme estabelecido pela Hipótese 1B, esta busca não é feita.
- Busca 2 (a partir do disparo de $T_{28.1.2}/T_{1.8.1}$): o sequente é construído com *marcação* inicial igual a condição pós disparo de $T_{28.1.2}/T_{1.8.1}$, com *transições* no sequente que atinjam a condição do evento final $T_{9.8.1}$, a *marcação* final após o evento final não é estabelecida pela Propriedade 1, então é dita como sendo $M_f = \emptyset$. A análise deste sequente é apresentada na Figura 5.4.

Com isso, observa-se que $\Gamma_f = P_{1.8.1}$. Após isto, a busca é interrompida, pois não há mais *transições* habilitadas no sequente.

- Cenário 3 (após o disparo de $T_{9.8.1}/T_{29.1.2}$): o sequente para este caso é $\Gamma_0, P_{1.8.1}, !T_{2.8.1}, \dots !T_{9.8.1} \vdash \Gamma_f$, como não há nenhuma como não há nenhuma *transição* habilitada, a busca encerra neste ponto com $\Gamma_f = P_{1.8.1}$.

Figura 5.4 – Sequente para $O_{8.1}$ (Ordem)

$$\begin{array}{c}
 \frac{P_{11.8.1} \vdash P_{11.8.1} \quad \Gamma_0, P_{1.8.1}, !T_{2.8.1}, !T_{3.8.1}, \dots, !T_{8.8.1}, !T_{9.8.1} \vdash \Gamma_f}{\otimes L(T_{9.8.1})} \\
 \frac{P_{10.8.1} \vdash P_{10.8.1} \quad \Gamma_0, P_{11.8.1}, !T_{2.8.1}, !T_{3.8.1}, \dots, !T_{8.8.1}, !T_{9.8.1} \vdash \Gamma_f}{\otimes L(T_{8.8.1})} \\
 \frac{P_{8.8.1}, P_{9.8.1} \vdash P_{8.8.1} \otimes P_{9.8.1} \quad \Gamma_0, P_{10.8.1}, !T_{2.8.1}, !T_{3.8.1}, \dots, !T_{8.8.1}, !T_{9.8.1} \vdash \Gamma_f}{\otimes L(T_{7.8.1})} \\
 \frac{P_{5.8.1}, P_{6.8.1}, P_{7.8.1} \vdash P_{5.8.1} \otimes P_{6.8.1} \otimes P_{7.8.1} \quad \Gamma_0, P_{8.8.1}, P_{9.8.1}, !T_{2.8.1}, !T_{3.8.1}, \dots, !T_{8.8.1}, !T_{9.8.1} \vdash \Gamma_f}{\otimes L(T_{5.8.1}, T_{6.8.1})} \\
 \frac{P_{2.8.1}, P_{3.8.1}, P_{4.8.1} \vdash P_{2.8.1} \otimes P_{3.8.1} \otimes P_{4.8.1} \quad \Gamma_0, P_{5.8.1}, P_{6.8.1}, P_{7.8.1}, !T_{2.8.1}, !T_{3.8.1}, \dots, !T_{8.8.1}, !T_{9.8.1} \vdash \Gamma_f}{\otimes L(T_{2.8.1}, T_{3.8.1}, T_{4.8.1})} \\
 \Gamma_0, P_{2.8.1}, P_{3.8.1}, P_{4.8.1}, !T_{2.8.1}, !T_{3.8.1}, \dots, !T_{8.8.1}, !T_{9.8.1} \vdash \Gamma_f
 \end{array}$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas buscas, os seguintes cenários são possíveis:

- Cenário 1-1-1: $T_{2.8.1}/T_{1.1.6}; T_{3.2.6}/T_{1.2.6}; T_{4.8.1}/T_{1.1.6}; T_{5.8.1}; T_{6.8.1}; T_{7.8.1}T_{8.8.1}/T_{1.1.4}; T_{9.8.1}/T_{1.1.2}$
- Cenário 1-1-2: $T_{2.8.1}/T_{1.1.6}; T_{3.2.6}/T_{1.2.6}; T_{4.8.1}/T_{1.1.6}; T_{5.8.1}; T_{6.8.1}; T_{7.8.1}T_{8.8.1}/T_{1.1.4}$
- Cenário 1-1-3: $T_{2.8.1}/T_{1.1.6}; T_{3.2.6}/T_{1.2.6}; T_{4.8.1}/T_{1.1.6}; T_{5.8.1}; T_{6.8.1}; T_{7.8.1}$
- Cenário 1-1-4: $T_{2.8.1}/T_{1.1.6}; T_{3.2.6}/T_{1.2.6}; T_{4.8.1}/T_{1.1.6}; T_{5.8.1}; T_{6.8.1}$
- Cenário 1-1-5: $T_{2.8.1}/T_{1.1.6}; T_{3.2.6}/T_{1.2.6}; T_{4.8.1}/T_{1.1.6}; T_{5.8.1};$
- Cenário 1-1-6: $T_{2.8.1}/T_{1.1.6}; T_{3.2.6}/T_{1.2.6}; T_{4.8.1}/T_{1.1.6};$

Além do Cenário 1-1-6, existem as combinações de cenários, onde ocorre o disparo de algumas *transições* e a não continuidade de disparos. Com base nos perfis dos cenários, se pode inferir os cenários restantes.

Etapa 5b.2 – Elaboração de Hipóteses (O_{8.1} Ordem)

Hipótese 1D: As chamadas de métodos do objeto O_{8.1} são imediatamente executadas pelos objetos O_{1.6} e O_{2.6} : $T_{2.8.1}/T_{1.1.6}$; $T_{3.2.6}/T_{1.2.6}$ disparam em $\Delta\theta = 0$ após estar habilitada em O_{1.6} e O_{2.6}.

Hipótese 1C: A chamada de método do objeto O_{8.1} é imediatamente executada pelo objeto O_{1.8} ..

Hipótese 1D: A chamada de método do objeto O_{8.1} não é imediatamente executada pelo objeto O_{1.8}. Devendo aguardar um tempo $\Delta\theta \geq \varepsilon_2$ equivalente ao tempo necessário para consecução da ordem pelos atuadores.

Hipótese 1E: A chamada de método do objeto O_{8.1} não é imediatamente executada pelo objeto O_{1.4}. Devendo aguardar um tempo $\Delta\theta \geq \varepsilon_3$ equivalente ao tempo necessário para consecução da ordem pelos atuadores.

Etapa 5b.3 – Elaboração da Análise Contínua (O_{8.1} Ordem)

Similar à análise realizada para na etapa 5.3.1, neste as hipóteses também são redutoras e diminuem o espaço de cenários possíveis. Restando apenas como cenário provável, o caso nomeado como Cenário 1-1-1.

A evolução da RdP PTD-OO no tempo depende do atendimento de diferentes necessidades geradas ou apresentadas às instalações. Onde os tempos ε_2 e ε_3 se acumulam durante o transcorrer da análise. Para cada elemento de tempo, no qual o sistema aguarda que outro objeto realize sua tarefa, há incremento nos valores de ε_n .

Novamente, devido às *transições* de interface, se faz necessária a busca nos objetos membros desta composição a fim de analisar a consistência destes. Entretanto, dado que a estrutura dos objetos apresenta grande similaridade entre si, e que as hipóteses a serem adotadas para os sistemas de controle, interfaces e sensores tornam o acréscimo de tempo por estas interfaces desprezíveis, além do que os atuadores operam normalmente com

tempos mais longos ou menos, se considera aqui desnecessária apresentar a análise pormenorizada de cada uma das outras subclasses.

Etapa 6 – Construção do Sequente Global

Embora, nem todas as classes tenham sido apresentadas, nesta etapa se desenvolve o sequente global completo, considerando as classes não apresentadas neste trabalho. Este sequente é apresentado como:

$$\begin{aligned}
 &P_{4_1.3}, P_{13_1.2}, P_{1_8.1}, P_{3_1.6}, P_{3_2.6}, P_{1_1.8}, P_{1_1.4}, P_{1_1.12}, P_{1_2.12}, P_{1_1.10}, P_{1_1.5}, P_{1_1.11}, P_{1_2.11}, \\
 &T_{5_1.3} / T_{27_1.2}, T_{28_1.2} / T_{1_8.1}, T_{2_8.1} / T_{5_2.6}, T_{3_8.1} / T_{5_1.6}, T_{10_1.6} / T_{3_1.12}, T_{10_2.6} / T_{3_2.12}, T_{5_8.1}, \\
 &T_{4_8.1} / T_{16_1.8}, T_{16_1.8} / T_{6_8.1}, T_{7_8.1}, T_{8_8.1} / T_{1_1.4}, T_{2_1.4} / T_{1_1.11}, T_{3_1.4} / T_{1_2.11}, T_{4_1.4}, T_{5_2.4}, \\
 &T_{6_1.4} / T_{9_8.1}, T_{9_8.1} / T_{29_1.2}, T_{29_1.2} / T_{6_1.3} \vdash P_{4_1.3} \otimes P_{13_1.2} \otimes P_{1_8.1} \otimes P_{3_1.6} \otimes P_{3_2.6} \otimes \\
 &P_{1_1.8}, \otimes P_{1_1.11} \otimes P_{1_2.11} \otimes P_{1_1.4} \otimes P_{1_1.12} \otimes P_{1_2.12} \otimes P_{1_1.10} \otimes P_{1_1.5}
 \end{aligned}$$

Este sequente pode ser simplificado a apenas relações identitárias, verificando assim que este cumpre o objetivo proposto, dado que as hipóteses adotadas sejam todas elas verdadeiras simultaneamente.

Etapa 7 – Verificação das Hipóteses

A fim de se verificar as hipóteses, entende-se que estas podem ser validadas ao fundir os modelos em RdP PTD-OO de modo que se tem grafos/modelos de maior complexidade, aplicando a cada um deles uma verificação de alcançabilidade (de estados – derivado da teoria de Rede de Petri). Alternativamente, as hipóteses podem ser verificadas por meio de estudo de *lugares* invariantes da teoria de Rede de Petri, permitindo assim que avaliações baseadas em formalismos matemáticos.

Igualmente, cabe ressaltar que a determinação das hipóteses para determinação da análise de alcançabilidade também costuma ser baseada na experiência do desenvolvedor dos modelos e de sua familiaridade com o tema em questão.

5.2 Avaliação do Modelo

Com a análise do modelo indicando que os sequentes globais para as diversas condições de operação são verdadeiros, por conseguinte entende-se que o modelo realiza as *atividades* elencadas em seu PFS, pois sua evolução ocorre conforme o esperado. Desta forma, com o modelo discreto atendendo aos requisitos é possível empregar este modelo para simulação durante a fase de “Projeto Preliminar”.

Durante esta fase do projeto do submarino, é importante avaliar diferentes opções de soluções de engenharia que atendam as necessidades do cliente. Um modelo que permita avaliar a evolução discreta dos sistemas de propulsão e de eletricidade simultaneamente é muito importante na determinação de diversos parâmetros tidos como críticos em um projeto naval: como quantidade de combustível necessário para atender as missões informadas pelo cliente; se o desempenho do sistema de propulsão – em termos de velocidade do submarino, de rotação do hélice – são adequados.

As informações obtidas pelo modelo auxiliam nas etapas da Espiral de Projeto, por exemplo: com os resultados de simulação de consumo de combustível é possível determinar o tamanho dos tanques e iniciar seu arranjo, cuja alteração afeta outros sistemas que influenciam novamente o sistema de propulsão e/ou de eletricidade. Desta forma, há um processo iterativo no projeto de um submarino, e possuir um modelo versátil com fácil adaptação de parâmetros – característica esta oriunda da capacidade de encapsulamento de informações em objetos – assiste o engenheiro projetista de submarinos em seu trabalho.

6 Conclusões

Este trabalho adota a visão de sistemas híbridos para a caracterização de um submarino convencional de modo que se utiliza como técnica de Rede de Petri PTD-OO (Predicado Transição Diferenciais Orientadas a Objetos) para a modelagem dos processos envolvidos. O foco aqui está em sistemas de propulsão e de eletricidade. O texto discorre a respeito do atual cenário tecnológico em que o projeto de submarinos está inserido, considerando aspectos de gerenciamento de projeto, além daqueles eminentemente técnicos. Foi realizada uma revisão sobre o tema de projeto de submarinos e a respeito de metodologias empregadas para desenvolvimento de modelos de sistemas e processos e com isso se apresenta a metodologia adotada neste trabalho.

Apresenta-se assim, a modelagem propriamente dita dos sistemas de propulsão e de eletricidade de um submarino inclui a descrição em PFS (*Production Flow Schema*) das funcionalidades consideradas, descrição em diagrama de Casos de uso para identificar os elementos, componentes, equipamentos que definem as classes e objetos a serem consideradas. Na sequência, se tem os diagramas de atividades que detalham o ordenamento das ações do sistema e os diagramas de sequência que explicitam no tempo as interações que ocorrem entre as partes (classes e objetos) identificadas. Estas partes classes são então detalhadas e suas funcionalidades modeladas em rede de Petri PTD-OO. Apresenta-se também, o procedimento para verificação de consistência para se confirmar que os métodos descritos são devidamente empregados e se há alguma inconsistência referente às operações do submarino.

6.1 Principais Contribuições

O emprego do paradigma de orientação a objetos para projetos navais em especial para o caso usado como exemplo de aplicação neste estudo faz com que seja possível hierarquizar diferentes componentes dos sistemas de propulsão e de eletricidade. Desta forma, a análise de cada um deles pode ser feita de forma individualizada e os resultados obtidos podem ser devidamente integrados conforme o projeto evolui em termos de definição dos conjuntos de elementos. Esta visão inicialmente segmentada dos diversos elementos constituintes permite explorar melhor os conhecimentos específicos de cada

especialista e identificar de modo mais claro as interfaces entre as partes envolvidas conforme a interação entre essas partes é estabelecida para a composição dos sistemas .

Em relação à metodologia para desenvolvimento de modelos de sistemas híbridos, foi feita uma revisão da proposta de Villani (2004) e Villani *et al.* (2007) com o objetivo de facilitar e reduzir o número de ciclos de verificação e alteração das tarefas, pois com os objetos definidos antes dos diagramas de atividades permite-se que o projetista utilize seu conhecimento prévio sobre o sistema acerca da especificação das atividades do sistema. Desta forma, há um aprimoramento no desenvolvimento dos modelos.

Outro ponto de destaque é ainda sobre a identificação de candidatos a objetos e classes, pois as três regras de decomposição e objetos, geralmente adotadas não são práticas para sistemas como o caso deste trabalho onde diversas variáveis contínuas são compartilhadas de forma ininterrupta, como as variáveis associadas à tensão, corrente e potência de equipamentos elétricos. Uma das regras de decomposição estabelece que são objetos distintos aqueles que compartilham variáveis contínua *por período limitado*, todavia esta regra dificulta a modelagem da bateria. Neste caso em particular, há uma noção intuitiva de que as ‘baterias’ poderiam ser modeladas separadamente do resto do sistema, porém ao verificar quais sistemas poderiam ser desacopladas da ‘bateria’, conclui-se que a ‘rede de distribuição’ seria uma classe vazia, visto que falhas elétricas não estão do escopo desta modelagem. Assim, aqui foi assumido uma diferença na natureza dos componentes e equipamentos com operações contínuas e discretas. Isto é, as baterias possuem um comportamento *descontínuo* em relação aos outros objetos, de modo que embora não ocorra uma interrupção por um período, a descontinuidade na operação é suficiente para separar claramente a natureza de um objeto de outro.

Embora, fosse possível criar um único objeto que compreendesse todos os equipamentos isto não é adequado e vai de encontro a proposta da metodologia que é prover um formalismo para modelar sistemas de maior complexidade. Consequentemente, a noção de descontinuidade na operação pode também ser vista como um tipo de interação discreta limitada no tempo – tecnicamente permitindo que os objetos sejam divididos segundo a segunda regra de tempo. De qualquer modo, neste trabalho foi adotada a visão de que descontinuidades podem ser entendidas como equivalentes ao compartilhamento de variáveis contínuas por tempo limitado – mas destaca-se que esta visão somente foi empregada na identificação dos objetos.

O modelo obtido de sistemas caracterizados como sistemas híbridos forneceu uma base onde outros profissionais podem empregar o modelo e/ou adaptá-lo a fim de atender a necessidades especiais como a operação integrada de um submarino, considerando diferentes áreas de conhecimento. Neste sentido, este trabalho vai ao encontro destes problemas ao prover uma abordagem baseada em formalismo que permite a consideração de variáveis de diferentes naturezas para o projeto de submarinos.

Acerca dos objetivos deste trabalho, o modelo obtido atende ao propósito por representar o modelo contínuo nos objetos e a evolução discreta do sistema. A análise apresentada no capítulo 5 também corrobora esta afirmação ao apresentar a análise da Rede de Petri PTD-OO para um dos Casos de uso.

Adicionalmente, com os modelos dos sistemas de propulsão e de eletricidade aqui desenvolvidos confirmou-se que diversos parâmetros podem ser estimados nas etapas conceituais de projetos: como quantidade de combustível necessária para atender a uma missão, dimensionamento das baterias, características do propulsor e parâmetros do motor elétrico de propulsão. Embora todas estas características sejam determinadas com maior precisão em outros momentos do projeto, vislumbrar nas etapas conceituais com certo grau de precisão estes valores, é efetivo na alocação correta de recursos por parte de outras equipes de projeto, como as encarregadas pelo resfriamento das máquinas e pelo arranjo físico das instalações.

6.2 Trabalhos futuros

O modelo obtido pode ser explorado para estudos específicos no âmbito das necessidades do cliente, em particular aqueles relacionados ao dimensionamento de submarinos na fase de “projeto inicial”. Por exemplo, estudo de diferentes cenários para avaliação de sensibilidade de certos parâmetros.

Outra possível linha de pesquisa é o impacto dos diferentes perfis operacionais no consumo de combustível ou mesmo no alcance da embarcação, assim como os resultados obtidos com o modelo podem ser empregados como fundamentos para estudos no nível estratégico do cliente.

Em termos de refinamento, o modelo desenvolvido neste trabalho pode ser ampliado de forma a contemplar não apenas uma classe Carga Hotel genérica que abarca todos os outros subsistemas do submarino. Em função do estudo ou do objetivo, a metodologia aqui

adotada pode ser utilizada para incluir outros sistemas ou mesmo refinar a modelagem desenvolvida para melhor caracterização dinâmica de certas variáveis.

Alternativamente, a metodologia descrita neste trabalho pode ser usada dentro da visão de *Projeto baseado em Modelo* (Langland *et al.* 2015) na qual o projeto de um submarino é realizado por meio de modelos implementados em RdP PTD-OO. Permitindo com que engenheiros navais possam empregar uma metodologia de projeto distinta das já tradicionais, como a Espiral de Projeto.

7 Bibliografia

- Bayoudh, M. and Trav, L. (2008) Hybrid systems diagnosis by coupling continuous and discrete event techniques. *Proceedings - 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. DOI: 10.1111/1468-5965.00200.
- Brasil (2002) EMA-420: Normas para Logística de Material na MB.
- Brasil (2013) Política Nacional de Defesa, a Estratégia Nacional de Defesa e o Livro Branco de Defesa Nacional. *Diário Oficial da União - Seção 1 - 26/9/2013, Pág.1*. Retrieved from http://www.defesa.gov.br/arquivos/estado_e_defesa/END-PND_Optimized.pdf.
- Brefort, D.; Shields, C.; Jansen, A.H.; Duchateau, E.; Pawling, R.; Droste, K.; Jasper, T.; ... Kana, A.A. (2018) An architectural framework for distributed naval ship systems. *Ocean Engineering*, 147. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.10.028.
- Camargo *et al.* (2016) Corveta Classe Tamandaré. *Revista Marítima Brasileira*. 1, 136 (2016), 161–177.
- Carvalho, L.M.F. (2009). *Sun Tzu e as Operações de Submarinos*. Monografia, Escola de Guerra Naval.
- Cassandras and Lafortune (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer.
- Chalfant, J.; Langland, B.; Abdelwahed, S.; Chrysostomidis, C.; Dougal, R.; Dubey, A.; ... Zivi, E. (2012) A collaborative early-stage ship design eEnvironment. *CEM Publications*.
- Chalfant, J. (2015) Early-stage design for electric ship. *Proceedings of the IEEE*. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2459672.
- Chen, C.; Yang, Y.; Wang, M. and Zhang, X. (2017) Characterization and evolution of emergency scenarios using hybrid Petri net. *Process Safety and Environmental Protection*. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.016.
- Chung, C.A. (2004) *Simulation Modeling Handbook: a Practical Approach*. CRC Press.
- Cooper, K.; Smart, R.; Chalfant, J.; Herbst, J.; Langland, B.; Card, A.; Leonard, R. and Gattozzi, A. (2017) Using S3D to analyze ship system alternatives for a 100MW 10,000ton surface combatant. *IEEE Electric Ship Technologies Symp. (ESTS)*. DOI: 10.1109/ESTS.2017.8069266.
- Costa, C.S. (2010) Abordagem Distribuída para Modelagem de Sistemas de Gerenciamento de Plataformas Navais. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

- Dong, L.; Dou, L.; Yang, H. and Liu, H. (2008) Hybrid modeling of control system based on hybrid Petri nets. *IEEE Intern. Conf. on Control and Automation, ICCA*. doi: 10.1109/ICCA.2007.4376742.
- Fang, I.H-C.; Cheng, F.; Incecik, A. and Carnie, P. (2013) *Global Marine Trends 2030*.
- Geertsma, R.D.; Negenborn, R.R.; Visser, K. and Hopman, J.J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: a review of developments. *Applied Energy*. 194. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
- Ginn, H.L.; Santi, E.; Langland, B.; Ferraro, A.; Arrua, S. and Abdollahi, H. (2017) Incorporation of control systems in early stage conceptual ship designs. In: *Proceedings - IEEE Electric Ship Technologies Symp. - ESTS*. DOI: 10.1109/ESTS.2017.8069252
- Gross, M. (2017) Before you spend \$2 Billion on your own submarine, read this. Bloomberg. <https://bloom.bg/2zkn1Gl>. Accessed: 21-Nov.-2018. Retrieved 21-Nov.-2018, from <https://bloom.bg/2zkn1Gl>.
- IEC (1994) IEC. Electrical Installations in Ships - Part 101: Definitions and General requirements. International Electrotechnical Commission.
- Jensen, K. (1996) *Coloured Petri Nets*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-03241-1.
- Jie, Z. and Wang, S.Z. (2009) Dynamics modeling and maneuverability simulation of the unmanned underwater vehicle hanging torpedoes externally. *Proceedings - Intern. Asia Conf. on Informatics in Control, Automation, and Robotics*. DOI: 10.1109/CAR.2009.68.
- Lamnabhi-Lagarigue, F.; Annaswamy, A.; Engell, S.; Isaksson, A.; Khargonekar, P.; Murray, R.M. ... Van den Hof, P. (2017) Systems & control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges. *Annual Reviews in Control*. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2017.04.001.
- Langland, B.; Leonard, R.; Smart, R. and Dougal, R.A. (2015) Modeling and data exchange in a concurrent and collaborative design environment for electric ships. *Proceedings - IEEE Electric Ship Technologies Symp., ESTS*. DOI: 10.1109/ESTS.2015.7157924.
- Letia, T.S, and Kilyen, A.O. (2016) Fuzzy logic enhanced time Petri Net models for hybrid control systems. *Proceedings - 20th IEEE Intern. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR*. DOI: 10.1109/AQTR.2016.7501322.
- Lv, Z.; Zhang, J.; Jin, J. and Liu, L. (2016) Link strength for unmanned surface vehicle's underwater acoustic communication. *IEEE/OES China Ocean Acoustics Symp., COA*.

DOI: 10.1109/COA.2016.7535831.

- Megretski, A. (2003) Dynamics of nonlinear systems. Accessed: 20-Nov.-2018. Retrieved 20-Nov.-2018, from <http://bit.ly/2KhQ5ml>.
- Mic, L.; Fat, R.; Santa, M.M. and Letia, T.S. (2018) Hybrid control models for flexible manufacturing systems. *Proceedings - IEEE Intern. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR*. DOI: 10.1109/AQTR.2018.8402742.
- Miyagi, P.E. (1996) *Controle Programável: fundamento do controle de sistemas a eventos discretos*. Editora Blücher.
- Ogata, K. (2010) *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson.
- Ozgun, A. and Murvet, K. (2015) Petri net models for manufacturing systems. *Proceedings - 4th Intern. Conf. on Agro-Geoinformatics*, 231–249.
- Pereira, M.H. (2016) *Modelo de Otimização Multiobjetivo Aplicado ao Projeto de Concepção de Submarinos Convencionais*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Psallidas, K.; Whitcomb, C.A. and Hootman, J.C. (2010) Design of conventional submarines with advanced air independent propulsion systems and determination of corresponding theater-level impacts. *Naval Engineers Journal*. 122 (1): 111–123. DOI: 10.1111/j.1559-3584.2010.00196.x.
- Reyes, R.I.V. (2004) *Modelagem de Sistemas C3I para Navios de Guerra através de Redes de Petri*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Santos Filho, D.J.; Silva, J.R.; Maruyama, N. and Miyagi, P.E. (2001) Estruturação da modelagem de processos em sistemas produtivos. *Anais - Simp. Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Sarro, T.J. (2016) *O uso do Submarino Nuclear pela Marinha do Brasil: Missões e Tarefas*. Dissertação de Mestrado, Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, RJ.
- Sick, N.; Nienaber, A-M.; Liesenkotter, B.; vom Stein, N.; Schewe, G. and Leker, J. (2016) The legend about sailing ship effects – Is it true or false? The example of cleaner propulsion technologies diffusion in the automotive industry. *Journal of Cleaner Production*. 137: 405–413. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.085.
- Suzuki, N.; Kitajima, H.; Kaba, H.; Suzuki, T.; Suto, T.; Kobayashi, A. and Ochi, F. (2015) An experiment of real-time data transmission of sonar images from cruising UUV to distant

support vessel via USV: Development of underwater real-time communication system (URCS) by parallel cruising. *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova*. DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271465.

Taveira, I. (2007). *Possibilidades e limitações da utilização do método de estudo de estado-maior como ferramenta de apoio à decisão nos novos processos de obtenção de meios flutuantes na marinha do Brasil*. Monografia, Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, RJ.

Tonacio, V.C. (2014) *Avaliação de propulsores navais em relação a eficiência e excitação de vibração*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

Villani, E. (2004) *Modelagem e Análise de Sistemas Supervisórios Híbridos*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Retrieved from <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-08062004-131133/>.

Villani, E.; Miyagi, P.E. and Valette, R. (2007) *Modelling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems: A Petri Net Approach*. Series Advances in Industrial Control, Springer.

Völker, T. (2015) Hybrid propulsion concepts on ships. *XXXIII Intern. Scientific Conf. on Science in Practice*, pp.66–76.

Yan, Z.; Xu, D.; Chen, T.; Zhou, J.; Wei, S. and ang, Y. (2017) Modeling , strategy and control of UUV for autonomous underwater docking recovery to moving platform. *Proceedings - 36th Chinese Control Conf. - CCC*, pp.4807–4812.

Yurenko, K. Fandeev, E. and Kharchenko, P. (2018). Investigation of optimal train movement modes by means of simulation modeling. *Proceedings - International Russian Automation Conf. - RusAutoCon*. DOI:10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501812

Zhang, W.; Teng, Y.; Chen, H. and Yu, C. (2016) On the robust model predictive control method of dynamic positioning to line for UUV recovery. *OCEANS MTS/IEEE Monterey*. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761042.