



# ESCOLA NAVAL



ta tante de bi faire

Nuno Gentil Costa e Nora Lopes Nunes

## **Definição das Máquinas Principais do Sistema Propulsor de uma Embarcação Não Tripulada - Uma Abordagem à Luz da Teoria Axiomática de Projeto**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,  
na especialidade de Engenheiros Navais – Ramo de Mecânica



Alfeite

2019





# ESCOLA NAVAL

*talant de ob'faire*



**Nuno Gentil Costa e Nora Lopes Nunes**

***Definição das Máquinas Principais do Sistema Propulsor de uma Embarcação  
Não Tripulada - Uma Abordagem à Luz da Teoria Axiomática de Projeto***

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na  
especialidade de Engenheiros Navais – Ramo de Mecânica**

**Orientação de:**

**Prof. Doutor Miguel José Pereira Sales Cavique Santos**

**CFR EN-MEC ACN Paulo Alexandre Marques Pires da Silva**

**O Aluno Mestrando**

**O Orientador**

---

Nuno Gentil Costa e Nora Lopes Nunes  
ASPOF EN-MEC

---

Miguel José Pereira Sales Cavique Santos  
Prof. Doutor

**Alfeite  
2019**



*“Dos fracos não reza a História”*

**Provérbio Português**



## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao meu orientar Professor Doutor Miguel Cavique Santos e ao meu coorientador Capitão de Fragata EN-MEC ACN Paulo Pires da Silva por todo o apoio, motivação, supervisão, tempo e paciência disponibilizada.

À minha família que, ao longo deste último ano, extremamente difícil, não me deixou desistir e não parou de puxar por mim.

Aos meus camaradas do Curso CMG Henrique Quirino da Fonseca, em especial aos GMAR da classe de Engenheiros Navais do ramo de Mecânica pelo apoio, paciência e motivação prestados.

Aos Professores militares e civis do Departamento de Ciências e Tecnologia da Escola Naval pelo apoio e preocupação.



## RESUMO

As Marinhas militares apresentam cada vez mais necessidade para assegurar o cumprimento de todas as missões que lhes são atribuídas podendo vir a ser auxiliadas pelo emprego de navios autónomos. Têm sido feitos avanços tecnológicos substantivos na área das Máquinas Marítimas aplicadas a veículos não tripulados. Existe, ainda, a necessidade do desenvolvimento do conhecimento na área de gestão de projeto. Deste modo, este trabalho vem abordar uma teoria de projeto em crescimento bem como a escolha das capacidades a serem atribuídas a um meio em desenvolvimento com capacidade de cumprir diversas missões. Este projeto irá proporcionar a aprendizagem de novos conceitos a serem lecionados e o desenvolvimento de projetos pelos Cadetes da Escola Naval.

[Teoria Axiomática de Projeto – Propulsão – Veículo Não Tripulado de Superfície – Teoria de Projeto]



## *ABSTRACT*

The Military navies are increasingly asked to ensure the fulfillment of the given missions, which is why, the use of autonomous vessels may come to their aid. Many technological advances in Maritime Machines employed in unmanned vessels have been made. There is, also, the need to develop the knowledge in Design Management. Thereby, this work deals with a growing design theory as well as the capabilities to be given to a unit in development with the potential to carry out several missions. This project will allow the learning of new concepts to be taught as well as project development to be carried out by Naval School's Cadets.

[Axiomatic Design Theory – Propulsion – Unmanned Surface Vehicle  
– Design Theory]



# ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VII
ÍNDICE GERAL .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XIII
INTRODUÇÃO .....	1
1. Conceito de Emprego VENT-SUP-EN .....	3
1.1. Emprego Operacional VENT-SUP .....	4
1.2. Emprego Operacional VENT-SUP-EN .....	9
1.2.1. Operações de Proteção de Força e Proteção Portuária .....	11
1.2.2. Operações de Levantamento Hidrográfico .....	12
1.2.3. Operações de Busca e Salvamento .....	12
1.2.4. Plataforma de Ensaio ao Ar Livre.....	13
1.3. Definição das Necessidades da Marinha .....	13
2. Teoria Axiomática de Projeto.....	17
2.1. Domínios.....	17
2.2. Hierarquia e Ziguezague.....	18
2.3. Axiomas .....	19
2.4. Matriz de Projeto .....	19
2.5. Corolários e Teoremas .....	21
2.6. Informação .....	23
2.7. Conjuntos Vagos.....	27
3. Estado da Arte VENT-SUP .....	31
3.1. Sistemas de Propulsão Naval .....	32
3.1.1. Instalação Propulsora a Vapor .....	32
3.1.2. Instalação Propulsora de Combustão Interna .....	33
3.1.3. Instalação Propulsora Elétrica .....	38
3.1.4. Instalação Propulsora de Energia Nuclear .....	44
3.1.5. Instalação Propulsora a Jato.....	44
3.1.6. Propulsão Combinada.....	46
3.2. Sistemas de Propulsão utilizados em VENT-SUP .....	48

3.2.1.	<b>Interceptor</b> .....	48
3.2.2.	<b>Anaconda 2.0</b> .....	49
3.2.3.	<b>Eclipse</b> .....	49
3.2.4.	<b>Protector</b> .....	50
3.2.5.	<b>Katana</b> .....	51
4.	<b>Aplicação do 1º Axioma da AP ao Projeto VENT-SUP-EN</b> .....	53
4.1.	<b>Definição dos FRs do Projeto</b> .....	53
4.1.1	<b>Potência</b> .....	53
4.1.2	<b>Autonomia</b> .....	58
4.1.3	<b>Autoadriçamento</b> .....	58
4.2	<b>Definição dos Constrangimentos do Projeto</b> .....	59
4.3	<b>Avaliação das Máquinas Principais</b> .....	60
4.3.1	<b>Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa</b> .....	60
4.3.2	<b>Máquina Principal de Combustão Interna Rotativa</b> .....	62
4.3.3	<b>Máquina Principal Elétrica</b> .....	64
4.3.4	<b>Máquina Principal Diesel-Elétrica</b> .....	66
4.3.5	<b>Máquina Principal Turbo-Elétrica</b> .....	67
4.3.6	<b>Máquina Principal Elétrica com uso de <i>Fuel Cells</i></b> .....	68
5	<b>Aplicação do 2º Axioma da AP ao projeto VENT-SUP-EN</b> .....	71
5.1	<b>FR<sub>1.1</sub></b> .....	71
5.2	<b>FR<sub>1.2</sub></b> .....	72
5.2.1	<b>Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa</b> .....	74
5.2.2	<b>Máquina Principal de Combustão Interna Rotativa</b> .....	75
5.2.3	<b>Máquina Principal Elétrica</b> .....	77
5.2.4	<b>Máquina Principal Diesel-Elétrica</b> .....	78
5.2.5	<b>Máquina Principal Turbo-Elétrica</b> .....	81
5.2.6	<b>Máquina Principal Elétrica com uso de <i>Fuel Cells</i></b> .....	83
5.3	<b>FR<sub>1.3</sub></b> .....	84
5.4	<b>Resultado da Avaliação Axiomática</b> .....	84
6.	<b>Conclusão</b> .....	87
	<b>Bibliografia</b> .....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Região de Busca e Salvamento sob responsabilidade Portuguesa .....	12
Figura 2 - Domínios do Projeto .....	17
Figura 3 - Processo Ziguezague com Hierarquia.....	18
Figura 4 - Área da fdp de um sistema (Suh, 2001) .....	25
Figura 5 - Valor de Pertença para a Escolha do Automóvel Ligeiro com base na Velocidade Máxima .....	28
Figura 6 - Diagrama de Instalação Propulsora a Vapor .....	33
Figura 7 - Motor Diesel a 2 Tempos .....	35
Figura 8 - Motor Diesel a 4 Tempos (adaptado de MotorCombustaoInterna.Blogspot.com) .....	35
Figura 9 - Turbina a Gás .....	37
Figura 10 - Componentes de um Motor Elétrico .....	39
Figura 11 - Comparação do Espaço utilizado por Sistemas de Propulsão.....	40
Figura 12 - Esquema do Funcionamento de uma Célula de Combustível a Hidrogénio (adaptado de Wikipedia) .....	42
Figura 13 - Diagrama de Instalação Propulsora de Funcionamento Misto .....	42
Figura 14 - Instalação Propulsora de funcionamento a Hidrojato .....	45
Figura 15 - Hidrojato.....	46
Figura 16 - Diagrama de uma Instalação Propulsora Combinada .....	48
Figura 17 - Interceptor (EUA).....	48
Figura 18 - Anaconda 2.0 (EUA).....	49
Figura 19 - Eclipse (EUA & EAU) .....	50
Figura 20 - Protector (Israel).....	50
Figura 21 - Katana (Israel).....	51
Figura 22 - Localização dos Tanques de Combustível .....	73
Figura 23 - Dimensões de um dos Tanque de Combustível projetados para o VENT-SUP- EN.....	74
Figura 24 - Sistema Moto Gerador .....	80
Figura 25 - Máquina Principal Turbo Gerador .....	82



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de Resistência em função da velocidade do VENT-SUP-EN obtido a partir do AutoPower® .....	54
Gráfico 2 - Gráfico de Resistência do VENT-SUP-EN obtido através da linha de tendência do Microsoft™ Excel. ....	55
Gráfico 3 - Curva de Resistência com base na Velocidade, típica de uma embarcação com casco planante. Adaptado de: (Bloomberg & Gross, 2014). ....	55
Gráfico 4 - Curva de Resistência com base na Velocidade, típica de uma embarcação com casco planante. Adaptado de: (Ladd, 1976). ....	56
Gráfico 5 - Gráfico de Potência com base na Velocidade do VENT-SUP-EN obtido a partir do AutoPower® .....	57
Gráfico 6 - Design Range do FR1.2 .....	73
Gráfico 7 - Common Area do FR <sub>1,2</sub> com a utilização de Motor Diesel .....	75
Gráfico 8 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Turbina a Gás e depósito de 400L .....	76
Gráfico 9 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Turbina a Gás e depósito de 700 L.....	77
Gráfico 10 - System Area do FR1.2 com a utilização exclusiva de Baterias .....	78
Gráfico 11 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Diesel-Elétrico sem Baterias	80
Gráfico 12 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Diesel-Elétrico com Baterias	81
Gráfico 13 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Turbo-Elétrico com baterias	83



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

A – Autonomia

AC – *Alternate Current*

AIP – *Air Independent Propulsion*

AP – Teoria Axiomática de Projeto

ASuW – *Anti-Surface Warfare*

ASW – *Anti-Submarine Warfare*

C – *Constraints*

CEM – Conceito Estratégico Militar

CEN – Conceito Estratégico Naval

CINAV – Centro de Investigação Naval

CN – *Customer Needs*

CODAG – *Combined Diesel and Gas*

CODOG – *Combined Diesel or Gas*

CPLP – Comunidade dos Países de Língua Portuguesa

DC – *Direct Current*

DP – *Design Parameters*

EAU – Emirados Árabes Unidos

EEINP – Espaço Estratégico de Interesse Nacional Permanente

EMA – Estado Maior da Armada

EN – Escola Naval

EN-MEC – Engenheiros Navais – Ramo de Mecânica

EU – União Europeia

EUA – Estados Unidos da América

FR – *Functional Requirement*

GMAR – Guarda-Marinha

GNL – Gás Natural Liquefeito

GPL – Gás de Petróleo Liquefeito

ISR – *Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*

I&D – Investigação e Desenvolvimento

MCI – Máquinas de Combustão Interna

MCM – *Mine Countermeasure*

MIFA – Missões das Forças Armadas

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

ONU – Organização das Nações Unidas

OTAN – Organização do Tratado do Atlântico Norte

PCI – Poder Calorífico Inferior

PTN – Pressão e Temperatura Normais

PV – *Process Variables*

ROV – *Remotely Operated Vehicle*

RPM – Rotações por Minuto

SAR – *Search and Rescue*

SOLAS – *Safety of Life at Sea*

SSS – *Self Synchronized System*

TN – Território Nacional

UUV – *Unmanned Underwater Vehicle*

V – Tensão do Circuito

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

VENT-SUP – Veículo Não Tripulado de Superfície

VENT-SUP-EN – Veículo Não Tripulado de Superfície da Escola Naval

ZEE – Zona Económica Exclusiva

## **INTRODUÇÃO**

Devido ao elevado número de ameaças que requerem missões exigentes, perigosas e complexas por parte das Forças Armadas, que muitas vezes põem em risco a vida dos militares que as cumprem, torna-se necessário o desenvolvimento de meios que reduzam a exposição humana a esses riscos. Devido a isto, várias Marinhas militares dedicaram meios para desenvolver veículos não tripulados capazes de cumprir diversas missões sem necessitar de tripulação. Portugal pretende também ter veículos não tripulados de superfície. Este trabalho vem contribuir para o desenvolvimento deste tipo de veículos, no que se relaciona com a escolha do tipo de máquina principal.

A Escola Naval, em conjunto com o CINAV, está a desenvolver um Veículo Não Tripulado de Superfície da Escola Naval (VENT-SUP-EN) que promoverá a aprendizagem e o ensino aos seus alunos não só na fase de construção do navio, como, futuramente, numa fase de cumprimento de Operações de interesse público no âmbito da segurança e autoridade do estado no mar em zonas a que esteja adstrito. É do interesse da Marinha Portuguesa ser capaz de empregar este tipo de veículo em qualquer zona de Operações, pelo que se torna necessário que o VENT-SUP-EN seja transportado e empregue a partir de unidades navais já existentes.

Este trabalho realiza-se no seguimento da Dissertação de Mestrado desenvolvida e apresentada pelo GMAR EN-MEC Pereira Lopes, relativa ao projeto conceptual da definição do casco do VENT-SUP-EN. Tem por objetivo a comparação de soluções possíveis para a máquina principal do sistema propulsor do navio, aplicando a Teoria Axiomática de Projeto. Esta teoria tem uma abordagem hierárquica e de sucessiva decomposição em níveis de detalhe crescente, pretendendo-se com os conhecimentos existentes e sem a utilização massiva de dados poder definir a um nível elevado o tipo de Máquina Principal para aplicação no projeto VENT-SUP-EN.



## 1. Conceito de Emprego VENT-SUP-EN

Portugal, enquanto Estado europeu e atlântico de vocação universal, encontra-se na Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), apresentando a 11ª maior Zona Económica Exclusiva (ZEE) do mundo, 3ª da União Europeia (UE), que ocupa “... uma área superior a 1,7 milhões de km<sup>2</sup>, correspondente quase a 19 vezes a área do território nacional...”<sup>1</sup>. A Divisão do Planeamento do Estado Maior da Armada definiu que é do interesse da Marinha Portuguesa possuir um VENT-SUP de modo a auxiliar Portugal a autonomamente ser capaz de assegurar a vigilância, segurança e autoridade na sua ZEE assim como a todos os navios e embarcações que nela naveguem. Por isso, a Marinha Portuguesa assegura várias unidades marítimas espalhadas pela Plataforma Continental Portuguesa (Portugal Continental, Região Autónoma dos Açores e Região Autónoma da Madeira). Estas forças têm a finalidade de assegurar entre outras, o cumprimento de missões de fiscalização e de controlo das atividades de pesca, deteção e controlo de atividades ilícitas, imigração ilegal, deteção de poluição marítima, controlo de tráfego marítimo, operações militares e busca e salvamento. É neste sentido que Portugal, tendo vários espaços marítimos sob a sua soberania e jurisdição, deverá ser capaz de honrar os compromissos assumidos nas mais diversas instâncias internacionais, garantindo a autoridade e segurança do Estado nas áreas geográficas sob a sua responsabilidade, fazendo face às ameaças inerentes a estes espaços.

No sentido do desenvolvimento e construção de um VENT-SUP, o CINAV associou-se à Escola Naval para concretizar o designado VENT-SUP EN, o que consiste num aliciante e enriquecedor desafio interdisciplinar capaz de promover a formação de alunos nas áreas de projeto, desenvolvimento e construção de navios. A abordagem da Escola Naval a este projeto tem sido feita numa perspetiva “*Project Based Learning*” em que os alunos desenvolvem as suas capacidades de “*problem solving*” ao resolverem os problemas relacionados com o desenvolvimento do projeto. Este tipo de aprendizagem apresenta-se como útil no desenvolvimento do projeto, na medida em que qualquer investigação ou resultado obtido, independentemente da metodologia utilizada, nunca será descartado, podendo até ser considerado como base ou ponto de partida para se

---

<sup>1</sup> (2015) Conceito Estratégico Naval, pp 2.1

continuar com o desenvolvimento de forma transversal envolvendo toda a comunidade académica.

Como se verá na secção seguinte, o VENT-SUP a projetar pode abarcar diversas missões. Face aos constrangimentos impostos, o VENT-SUP EN poderá fazer face a um subconjunto das missões enunciadas, que serão descritas mais à frente.

### **1.1. Emprego Operacional VENT-SUP**

O documento “Missões das Forças Armadas – MIFA 2014”, a seguir designado MIFA, definido pelo Conselho Superior de Defesa Nacional, identifica as missões de nível estratégico-militar cometidas às Forças Armadas. O projeto VENT-SUP enquadra-se enquanto unidade naval no cumprimento de algumas das ditas missões e subsequentes tarefas nos âmbitos atribuídos. As missões das Forças Armadas Portuguesas, a seguir referidas no formato M#, e as submissões, referidas por M#. #, são definidas nos seguintes âmbitos<sup>2</sup>:

No âmbito da Segurança e defesa do Território Nacional (TN) e dos cidadãos (**M1**) apresenta-se a própria Defesa Convencional do TN (**M1.1**), bem como a Garantia de Circulação no Espaço Interterritorial (**M1.2**), a atuação em casos de estado em exceção (**M1.3**), a evacuação de cidadãos nacionais em áreas de crise (**M1.4**), a extração/proteção de contingentes e forças nacionais destacadas (**M1.5**), a Ciberdefesa (**M1.6**) e a cooperação com as forças e serviços de segurança locais (**M1.7**).

No âmbito da Defesa coletiva (**M2**), Portugal assume a responsabilidade da defesa das nações aliadas (**M2.1**), responsabilidade acrescida ao se encontrar numa Organização como a OTAN.

No Exercício da soberania, jurisdição e responsabilidade nacional (**M3**), as Forças Armadas portuguesas asseguram a vigilância e controlo, incluindo a fiscalização e o policiamento aéreo, dos espaços sob soberania e jurisdição nacional (**M3.1**), a busca e

---

<sup>2</sup> Missões das Forças Armadas, pp 2-7 (presente em ANEXO A)

salvamento (**M3.2**) e a segurança das linhas de comunicação no Espaço Estratégico de Interesse Nacional Permanente (EEINP)<sup>3</sup> (**M3.3**).

Referente à Segurança Cooperativa (**M4**), Portugal assegura Operações de Resposta a Crises no âmbito da OTAN (**M4.1**), outras operações e missões no âmbito da OTAN (**M4.2**), operações e missões no âmbito da UE (**M4.3**), operações de Paz no âmbito da ONU e CPLP (**M4.4**) e ainda operações e missões no âmbito de acordos bilaterais e multilaterais (**M4.5**).

As Forças Armadas portuguesas ainda participam no apoio ao desenvolvimento e bem-estar (**M5**) na medida em que fornecem apoio à proteção e salvaguarda de pessoas e bens (**M5.1**) e apoio ao desenvolvimento (**M5.2**) na medida possível.

Devido ao seu cariz militar, às Forças Armadas nacionais é também incumbida a missão de cooperação e assistência militar (**M6**) de natureza bilateral e multilateral (**M6.1**) e eventuais ações no âmbito da reforma do sector de segurança de outros países (**M6.2**).

A fim de garantir a necessária vantagem sobre potenciais ameaças e aproveitando o acelerado desenvolvimento científico-tecnológico será inserido neste âmbito o emprego operacional do VENT-SUP. Este equipamento apresenta maior flexibilidade e menores custos associados que os meios convencionais, auxiliando e promovendo o desenvolvimento da Marinha Portuguesa. Em particular, deverá dar resposta às seguintes ameaças aos interesses nacionais estabelecidas para o âmbito da ação da Marinha<sup>4</sup>:

- a) O ataque ao território nacional;
- b) As perturbações da ordem constitucional democrática;
- c) As crises e os conflitos em países acolhedores da diáspora portuguesa;
- d) As ações adversas que impeçam a circulação interterritorial nacional;
- e) As ações cibernéticas sobre redes de informação e bases de dados;

---

<sup>3</sup> EEINP - O Espaço Estratégico de Interesse Nacional Permanente é o espaço que corresponde ao território nacional compreendido entre o ponto mais a norte, no concelho de Melgaço, até ao ponto mais a sul, nas ilhas Selvagens, e do seu ponto mais a oeste, na ilha das Flores, até ao ponto mais a Este, no concelho de Miranda do Douro, bem como o espaço interterritorial e os espaços aéreos e marítimos sob responsabilidade ou soberania nacional.

<sup>4</sup> (2015) Conceito Estratégico Naval, pp 2.4

- f) O ataque a um país aliado;
- g) A exploração ilegal dos recursos naturais (inclui atividades de pesca ilegal e irregular);
- h) A proliferação de armas de destruição massiva;
- i) O terrorismo;
- j) A criminalidade transnacional (inclui tráfico de droga, de armas e de pessoas);
- k) As migrações irregulares;
- l) A pirataria marítima;
- m) As catástrofes naturais, as situações ambientais extremas e os desastres ambientais no território nacional (inclui a poluição do mar).

Podendo também vir a auxiliar no âmbito da ação da Marinha, para além das ameaças, nomeadamente nas seguintes oportunidades<sup>5</sup>:

- a) A cooperação e fortalecimento dos laços no âmbito das alianças e parcerias com outros países, incluindo a assistência militar;
- b) O conhecimento, a investigação e o desenvolvimento científico (I&D) no domínio do mar;
- c) O desenvolvimento económico associado ao mar, promovendo a segurança da navegação, o crescimento do movimento portuário e do turismo náutico e marítimo.

O documento de Conceito Estratégico Militar 2014 (CEM 2014) enuncia as ameaças acima listadas e os riscos associados.

No âmbito das funções da Marinha previstas no Conceito Estratégico Naval (CEN) 2015, nomeadamente Segurança e Autoridade do Estado e Desenvolvimento Económico, Científico e Cultural, os VENT-SUP poderão contribuir para as seguintes operações e suas tarefas inerentes, presentes no quadro das MIFA 2014:

1) Operações Anfíbias:

**M1.1, M1.4, M1.5, M2.1, M4.1, M4.2, M4.3**

- a. Caracterização ambiental (perfil de praia, topografia e oceanografia);
- b. Recolha de informação, vigilância, reconhecimento tático e operacional;

---

<sup>5</sup> Ibidem, pp 2.4-2.5

- c. Apoio ao comando, controlo e comunicações (C3) através de relé e transporte de dados.

2) Operações de Busca e Salvamento Marítimo:

**M3.2**

- a. Detecção de contactos (indivíduos e embarcações);
- b. Seguimento automático de contactos (registo radar, laser e multiespectral);
- c. Transporte e libertação de meios de salvamento.

3) Operações de Guerra Antiaérea:

**M1.1, M1.2, M1.4, M1.5, M1.7, M2.1, M3.1, M3.3, M4.1, M4.2, M4.3, M4.4**

- a. Apoio ao comando, controlo e comunicações (C3) através de relé e transporte de dados.

4) Operações de Guerra Antissubmarina:

**M1.1, M1.2, M1.7, M2.1, M3.3, M4.1, M4.2, M4.3, M4.4**

- a. Detecção de submarinos (registo multiespectral, acústico e anomalia magnética);
- b. Apoio ao comando, controlo e comunicações (C3) através de relé e transporte de dados.

5) Operações de Guerra de Minas:

**M1.1, M1.2, M1.4, M1.5, M2.1, M3.3, M4.1, M4.2, M4.3,**

- a. Detecção de minas (registo multiespectral, anomalia magnética);
- b. Apoio ao comando, controlo e comunicações (C3) através de relé e transporte de dados.

6) Operações de Guerra de Superfície:

**M1.1, M1.2, M1.4, M1.5, M1.7, M2.1, M3.1, M3.3, M4.1, M4.2, M4.3, M4.4**

- a. Detecção de contactos de superfície;
- b. Seguimento automático de contactos de superfície (registo radar, laser e multiespectral);
- c. Apoio ao comando, controlo e comunicações (C3) através de relé e transporte de dados.

7) Operações de Guerra Eletrónica:

**M1.1, M1.2, M1.4, M1.5, M1.7, M2.1, M3.1, M3.2, M3.3, M4.1, M4.2, M4.3, M4.4**

- a. Detecção de frequências eletromagnéticas;
  - b. Aplicação de medidas ativas (capacidade de “*jamming*”).
- 8) Operações de Monitorização de Infraestruturas:
- M1.3, M1.7, M3.1, M5.1, M5.2**
- a. Avaliação do estado de infraestruturas (registo radar, laser e multiespectral).
- 9) Operações de Proteção de Força e Proteção Portuária:
- M1.1, M1.2, M1.4, M1.5, M1.7, M2.1, M4.1, M4.2, M4.3, M4.4, M4.5, M5.1, M6.1**
- a. Detecção de contactos de superfície;
  - b. Seguimento automático de contactos (registo radar, laser e multiespectral);
  - c. Recolha de informação, vigilância, reconhecimento tático e operacional;
  - d. Apoio ao comando, controlo e comunicações (C3) através de relé e transporte de dados.
- 10) Operações de Recolha de Dados Ambientais:
- M5.1, M5.2**
- a. Levantamentos Hidrográficos;
  - b. Levantamentos Oceanográficos;
  - c. Detecção e seguimento de hidrocarbonetos;
  - d. Levantamentos Topográficos;
  - e. Observações Meteorológicas;
  - f. Detecção radiológica, biológica e química.
- 11) Operações de Vigilância, Fiscalização e Segurança Marítima:
- M1.2, M1.3, M1.7, M3.1, M3.2, M3.3, M4.5, M5.1, M5.2, M6.1, M6.2**
- a. Detecção de contactos de superfície;
  - b. Seguimento automático de contactos (registo radar, laser e multiespectral);
  - c. Recolha de informação, vigilância, reconhecimento tático e operacional;
  - d. Recolha de meios de prova;
  - e. Apoio ao comando, controlo e comunicações (C3) através de relé e transporte de dados.

Foi definido pela Marinha Portuguesa (não referenciado devido à classificação), que um dos objetivos dos VENT-SUP é a sua utilização a partir de unidades navais ou unidades em terra (fuzileiros e/ou mergulhadores).

Numa situação ideal, o VENT-SUP será capaz de satisfazer todas as operações enunciadas. Estas operações poderão ser satisfeitas por diversos tipos de VENT-SUP dedicados a certo tipo de operações, ou assumir a possibilidade de integrar todos os sensores e equipamentos. Esta segunda possibilidade afigura-se contrária ao objetivo do VENT-SUP definido pela Marinha, que refere que o VENT-SUP seja empregue a partir de navios da esquadra, dadas as dimensões e peso espectável do equipamento necessário ao cumprimento de todas as missões. Existe ainda a possibilidade de conceptualizar um veículo modular com capacidade de ser adaptado para o cumprimento de cada umas das missões a que seja adstrito na Área de Operações sendo apenas aplicados os equipamentos e sensores necessários para o cumprimento das missões a que o VENT-SUP seja destinado.

## **1.2. Emprego Operacional VENT-SUP-EN**

Como previamente referido, a abordagem deste projeto por parte da Escola Naval tem sido na base do *Project Based Learning*, pelo que, visto que esta dissertação de mestrado se encontra no seguimento do trabalho desenvolvido pelo GMAR EN-MEC Pereira Lopes, é do interesse do desenvolvimento do projeto seguir algumas das decisões por ele tomadas. O VENT-SUP-EN será da primeira tipologia apresentada: não modular, capaz de executar todas as operações nomeadas quando adstrito a uma área de Operações.

O interesse do VENT-SUP-EN ser uma embarcação a ser empregue pela Escola Naval com o objetivo de instrução, promovendo a formação dos jovens Cadetes da Escola Naval, motivou que a avaliação das diversas operações enunciadas para o VENT-SUP se restringisse às seguintes:

- 1) Operações de Proteção de Força e Proteção Portuária;
- 2) Operações de Monitorização de Desastres Ambientais;
- 3) Operações de Guerra de Minas;
- 4) Operações de Levantamento Hidrográfico;
- 5) Operações de Busca e Salvamento;
- 6) Plataforma de Ensaio ao Ar Livre.

As “Operações de Monitorização de Desastres Ambientais” vêm no sentido de auxiliar a Missão de Combate à Poluição. Esta Missão pode consistir numa evasão ou combate a um grande número de desastres possíveis como, por exemplo, o combate à poluição do mar por hidrocarbonetos ou por plástico. Esta missão exige um número variado de equipamentos e acessórios que podem facilmente avariar com o uso e o passar do tempo. São exemplos, tubos hidráulicos e bombas de aspiração (sujeitos a entupirem devido a detritos ou outros agentes presentes na água). Grande parte das avarias deste tipo de equipamentos é de fácil e rápida reparação com a presença humana a bordo, levando a que o VENT-SUP-EN deixe de ser considerado autónomo na extensão planeada. Este tipo de Operações requerer ainda, associados ao VENT-SUP-EN, tanques de armazenamento dos produtos poluentes encontrados no mar e um laboratório para efetuar estudos dos poluentes com o objetivo de os identificar e caracterizar a ameaça presente. Deste modo, esta operação não será alvo do objetivo do VENT-SUP-EN.

De acordo com a pesquisa efetuada sobre veículos autónomos de superfície em uso, é possível descartar-se, também, as “Operações de Guerra de Minas”. Relativamente a este tipo de operações, já existem vários VENT-SUP noutras marinhas com esta capacidade, estando sempre associados a um UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*) ou um ROV (*Remotely Operated Vehicle*) para proceder à neutralização da ameaça. Apesar da tecnologia em vigor na Marinha Portuguesa incluir UUVs, a sua utilização através de VENT-SUP-EN requer que este seja capaz de o carregar e manobrar, o que implica não só um aumento da capacidade de carga e uma redução no espaço disponível do VENT-SUP, como também um aumento de equipamentos a bordo capazes de lançar, transportar e recolher o UUV após a desativação da mina.

Deste modo, identificam-se como operações a serem desenvolvidas pelo VENT-SUP-EN, as de “Proteção de Força e Proteção Portuária”, “Levantamento Hidrográfico”, “Busca e Salvamento” e “Ensaio ao Ar Livre”.

Para cada operação é necessário avaliar as características do sistema propulsor.

### 1.2.1. Operações de Proteção de Força e Proteção Portuária

As zonas portuárias são zonas muito povoadas devido ao contacto direto com o mar e às condições favoráveis para o comércio, a indústria, o turismo e os negócios, tornando-se muitas vezes em centros de comércio e transporte de carga. Normalmente associados a esta alta densidade de atividades, existem diversos acessos, seja por água (canais de navegação) ou por terra (estradas ou ferrovias). A presença de tanta atividade, concentrada numa zona com acesso facilitado, torna as zonas portuárias em alvos de interesse para ataques terroristas. Apesar de Portugal ser considerado um país com elevados níveis de segurança, não se poderá ignorar a possibilidade de virem a existir tentativas de atos terroristas. Assim, será um dos objetivos estratégicos navais, como definido no *CEN (2015)*:

*“Assegurar a componente naval da defesa militar do território nacional, garantindo a dissuasão credível necessária à manutenção da integridade do território, a segurança da circulação interterritorial de pessoas e bens, a afirmação no mar da soberania nacional e da defesa dos interesses nacionais” e ainda “a defesa militar própria e autónoma, que inclui a dissuasão militar, a legítima defesa e a resistência em caso de invasão do território nacional”.*

Para além de ataques ao território nacional provenientes do mar, a Marinha Portuguesa é muitas vezes empregue em missões internacionais em diversas áreas de conflito, pelo que é também do interesse da Marinha assegurar a proteção dos navios nesses locais. Nas operações de proteção de força e proteção portuária o VENT-SUP-EN necessitará de ter capacidade para:

- Detecção de contactos de superfície ou subsuperfície;
- Seguimento automático de contactos;
- Recolha de informação, vigilância e reconhecimento tático e operacional;
- Dissuasão.

Nenhuma destas tarefas requer especial atenção por parte do sistema propulsor, no entanto, torna-se necessário garantir uma velocidade máxima de 35 nós para ser possível proceder-se ao seguimento e eventual perseguição de contactos na área, o que condiciona a potência do sistema propulsor.

### 1.2.2. Operações de Levantamento Hidrográfico

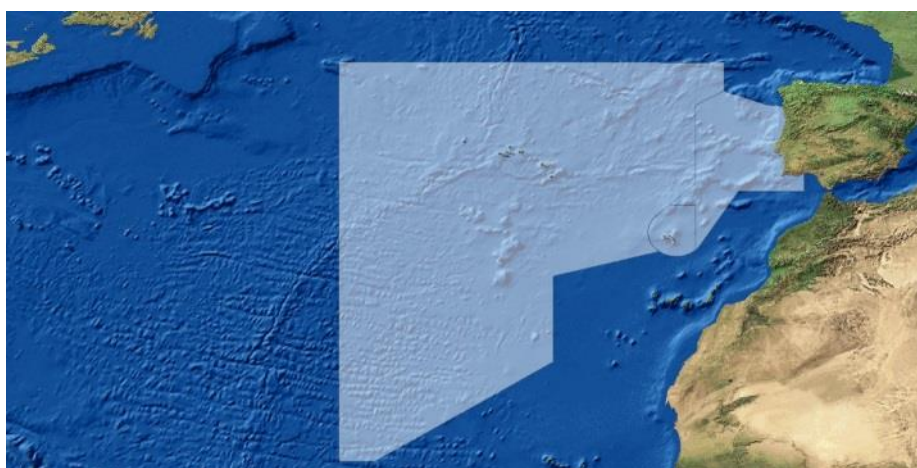
Portugal possui uma vasta área marítima sob sua soberania e responsabilidade, sendo uma das missões da Marinha contribuir para a Investigação e Desenvolvimento Científico. Em particular, inclui-se nesta missão o estudo do fundo da parte oceânica a seu encargo e compilação de cartografia oceânica.

Este tipo de Operações obriga a levar sondas e equipamentos de recolha de dados, que não requerem especial atenção por parte do sistema propulsor.

### 1.2.3. Operações de Busca e Salvamento

Como definido pelo Decreto-Lei nº15/94, a região para a Busca e Salvamento Marítimo de responsabilidade portuguesa é cerca de 62 vezes a dimensão do território nacional. Presente no nº2 do artigo 98º da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, todo o Estado costeiro deve promover o estabelecimento, funcionamento e a manutenção de um adequado e eficaz serviço de busca e salvamento, capaz de responder às necessidades de assistência a pessoas em perigo no mar 24 horas por dia, 7 dias por semana e 365 dias por ano. Esta região de Busca e Salvamento Marítimo de Portugal contém uma área de 5,7 milhões de km<sup>2</sup>.

A Figura 1 indica a extensa área de busca e salvamento da responsabilidade da República Portuguesa.



*Figura 1 - Região de Busca e Salvamento sob responsabilidade Portuguesa*

Na primeira descrição do projeto VENT-SUP-EN, foi determinado que a embarcação teria capacidades autoendireitantes em detrimento da possível capacidade

de embarque de pessoas numa situação de Busca e Salvamento, pelo que será essa a posição tomada nesta fase de projeto. Visto que a capacidade de embarque de náufragos foi descartada, a embarcação irá conter meios de sustentação ejetáveis (e.g. balsas salva-vidas) com possibilidade de emprego junto a situações de Homem ao Mar. As capacidades de autoadriçamento requerem uma atenção especial por parte da propulsão no sentido em que se o motor propulsor for do tipo *Máquina de Combustão Interna* (MCI) e o VENT-SUP-EN se encontrar perto duma posição invertida (prévia a uma situação de autoadriçamento), deverão ser tomadas medidas para evitar a entrada de água pela válvula de admissão ou evacuação e evitar a drenagem de óleo do cárter (para uma MCI alternativa).

Os requisitos do sistema propulsor para este tipo de missões são os seguintes:

- Velocidade Máxima Elevada (de modo a assegurar o apoio a eventuais náufragos na área);
- Autonomia mínima de 4 horas à velocidade máxima;
- Sobreviver a uma posição de grande adornamento prévia ao autoadriçamento da embarcação.

#### **1.2.4. Plataforma de Ensaios ao Ar Livre**

O VENT-SUP-EN deverá permitir uma utilização como Plataforma de Ensaios ao Ar Livre, no meio marítimo, como complemento aos laboratórios e à simulação executados na Escola Naval. Este tipo de Operações facilita a aprendizagem dos cursos ministrados na Escola Naval, por exemplo, através da aplicação da recolha de dados de posicionamento, da aquisição de dados de velocidade e aceleração em seis graus de liberdade e do eventual teste de futuros equipamentos. Esta função vem ao encontro do estabelecido no CEN<sup>6</sup>, através da disponibilização de um meio capaz de promover a investigação e o desenvolvimento científico (I&D) em ambiente marítimo.

### **1.3. Definição das Necessidades da Marinha**

À luz da Teoria Axiomática é necessário definir as Necessidades da Marinha para definir os Requisitos Funcionais e Constrangimentos aplicados ao projeto. As

---

<sup>6</sup> (2015) Conceito Estratégico Naval, pp 2.4

Necessidades da Marinha Portuguesa no desenvolvimento do projeto de uma unidade naval passam pelo cumprimento das missões, operações e tarefas a serem desempenhadas por essa unidade ao serviço da República Portuguesa. De todas as missões e operações mencionadas anteriormente, a missão de Busca e Salvamento é a que requer requisitos mais exigentes para o sistema propulsor. Sendo primordial a intervenção de meios de sustentação com o objetivo de evitar que eventuais naufragos se cansem ou afoguem, a velocidade máxima do VENT-SUP-EN deverá ser elevada de modo a garantir uma intervenção num espaço de tempo adequado às condições meteo-oceanográficas. Para que o VENT-SUP-EN seja capaz de desempenhar as operações mencionadas em segurança nas águas da sua área de operações (orla costeira, espaços marítimos sob jurisdição, soberania ou responsabilidade nacional e alto mar), é necessário que as suas características o permitam efetuar as tarefas atribuídas com capacidade de sobrevivência em condições de mar “grosso”, estado de mar 5 na escala de *Douglas*, e condições de vento “muito fresco”, força 6 na escala de *Beaufort*.

A autonomia e a velocidade de uma unidade naval são dois dos Requisitos Técnicos mais importantes da unidade e, normalmente estão relacionados um com o outro. Relativamente à autonomia, no âmbito das operações de busca e salvamento, considera-se importante que o VENT-SUP-EN seja capaz de acudir a situações de emergência a uma distância de 15 milhas náuticas do navio hospedeiro (de modo a poder assegurar a transmissão de dados e um controlo da embarcação permanente através do sistema de comunicações contínuos), pelo que foi definido uma autonomia mínima de 4 horas à velocidade que exija um maior consumo de combustível.

No Projeto Conceptual do VENT-SUP-EN foi definido que a embarcação será capaz de atingir velocidades de 35 nós. No entanto, de modo a garantir uma melhor assistência a eventuais casos de emergência, será acrescentada uma margem de 5 nós para compensar quaisquer alterações de rumo provocadas pela corrente, vento ou nível de tráfego que se apresente na área, definindo, portanto, uma velocidade máxima de 40 nós. Esta definição de velocidade máxima vai ao encontro da necessidade apresentada nas operações de proteção de força e proteção portuária.

Tendo o VENT-SUP-EN capacidades de autoadriçamento e podendo esta característica influenciar o funcionamento da Instalação Propulsora, há que ser tomada em conta na definição dos requisitos do sistema propulsor.

Resumindo, serão estas as Necessidades da Marinha face ao sistema propulsor do VENT-SUP-EN:

1. Garantir uma Velocidade Máxima de 40 nós;
2. Permitir uma Autonomia de 4 horas;
3. Suportar o Autoadriçamento do VENT-SUP-EN.



## 2. Teoria Axiomática de Projeto

A Teoria Axiomática de Projeto (AP), ou *Axiomatic Design*, foi desenvolvida pelo Professor Nam Pyo Suh, como resultado do trabalho realizado durante a sua permanência no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) nos anos 80.

A teoria baseia-se na satisfação de dois axiomas. Estes axiomas, a serem enunciados mais à frente, funcionam como critérios objetivos de avaliação da qualidade dos projetos propostos, facilitando o desenvolvimento e a escolha do projeto a adotar, por parte da equipa de projeto, aumentando assim a sua produtividade. Esta Teoria de Projeto vem estabelecer uma fundamentação científica no campo do desenvolvimento de um projeto, aplicável à criação de produtos, processos, sistemas, *software* e organizações, levando o desenvolvimento de projetos num sentido completamente diferente do, até então utilizado: o empirismo e a intuição. A definição de princípios científicos veio sistematizar o desenvolvimento e clarificar os seus procedimentos, promovendo uma aprendizagem mais fácil do projeto.

### 2.1. Domínios

A AP envolve quatro Domínios, cada um necessário para a definição do Domínio subsequente. No primeiro, o Domínio do Cliente, são definidas as Necessidades do Cliente, ou *Customer Needs* (CNs), satisfazendo os respetivos Constrangimentos (Cs) impostos ao projeto. Seguem-se, os domínios Funcional, Físico e do Processo, como presente na Figura 2. Um projeto é a definição alternada entre o Domínio Funcional e o Domínio Físico num processo sucessivo de decomposição desde o nível mais elevado de conceção do sistema, definindo fisicamente os subsistemas, equipamentos e peças que o constituam. A definição dos elementos e das relações de dependência entre domínios é intitulada de *mapeamento* e representada pelas matrizes de projeto.



Figura 2 - Domínios do Projeto

O Domínio Funcional contempla os Requisitos Funcionais, ou *Functional Requirements* (FRs), ou seja, a definição das funções que o projeto deverá ser capaz de desempenhar a partir das CNs e os Cs impostos. O Domínio Físico é composto pelos Parâmetros de Projeto, ou *Design Parameters* (DPs), obtidos de modo a satisfazer os FRs e que definem o sistema fisicamente. Por fim, no Domínio do Processo, estão presentes as Variáveis de Processo, ou *Process Variables* (PVs), necessárias ao fabrico dos DPs, como processos de maquinagem ou moldagem a serem utilizados com a finalidade de criar os componentes físicos capazes de satisfazer os FRs.

## 2.2. Hierarquia e Ziguezague

De acordo com a AP, um projeto terá de seguir uma hierarquia, começando no nível mais elevado (nível do sistema), procedendo para níveis mais detalhados (subsistemas, equipamentos e peças) de modo a que o sistema seja claramente definido. Os FRs são definidos em níveis sucessivos de decomposição, de modo a que cada nível espelhe ao mesmo tempo o nível acima assim como o DPs escolhidos no nível acima. Deste modo, um DP de um determinado nível deverá estar contido em DPs de níveis superiores e ter influência direta nos FRs do nível inferior. A este processo atribuiu-se a designação por “Ziguezague”, retratado na Figura 3. De modo a tornar o desenvolvimento do projeto mais fácil, deverá ser feito um esforço para manter o número de FRs o mais baixo possível nos níveis mais elevados do projeto.

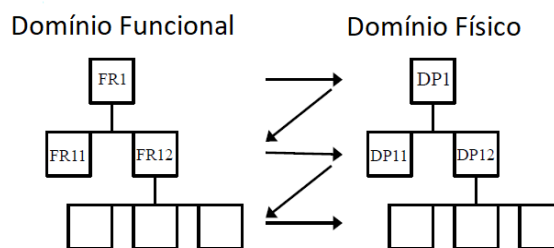


Figura 3 - Processo Ziguezague com Hierarquia

Este trabalho irá centrar-se no mapeamento entre o Domínio do Cliente, o Domínio Funcional e o Domínio Físico a um nível elevado de projeto, não abordando o Domínio do Processo.

### 2.3. Axiomas

Por definição, axiomas são verdades fundamentais, sem exceções ou contraexemplos que neguem a sua validade. Os dois axiomas apresentados como fundamentos da AP são referentes ao mapeamento entre o domínio funcional e o domínio físico e estão diretamente relacionados com a probabilidade de sucesso do projeto.

O 1º Axioma, “*Manter a Independência dos Requisitos Funcionais*”, refere que, a definição dos FRs, no domínio funcional, deve garantir a independência entre si. Por outro lado, no mapeamento entre os domínios, os FRs devem poder ser alcançados de modo independente a partir dos DPs definidos. Idealmente um DP no domínio físico deverá afetar somente o FR a que se refere. Esta relação entre DPs e FRs traduz-se na matriz de projeto, que será abordada mais à frente. A forma da matriz de projeto define a qualidade de um projeto.

O 2º Axioma, “*Minimizar o Conteúdo de Informação*”, refere que, de todos os projetos, ou subprojectos, que cumpram o 1º Axioma, aquele que tiver o mínimo conteúdo de informação será o escolhido. É de notar que é possível desenvolver um elevado número de projetos capazes de satisfazer um dado grupo de FRs. O conteúdo de informação necessário presente num projeto é uma maneira de identificar a complexidade do projeto, não dependendo do número de subsistemas, equipamentos ou peças necessárias ao funcionamento do sistema. A informação em AP é uma medida da probabilidade de sucesso do funcionamento do sistema, calculada no domínio funcional.

### 2.4. Matriz de Projeto

Na AP define-se a equação do projeto como:

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (1)$$

Onde, {FR} com **m** valores e {DP} com **n** valores são vetores contendo FR e DP, respetivamente, e a matriz [A], com o formato **m**×**n**, representa a matriz de projeto:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m,1} & \cdots & A_{m,n} \end{bmatrix}$$

cujos elementos ( $A_{i,j}$ ) poderão ser valores numéricos constantes, funções matemáticas ou simplesmente um “X” para indicar uma relação entre um DP e um FR. Nos casos em que um DP não influencia um FR, essa relação é representada com o valor zero na matriz de projeto. O cumprimento de um dado FR será, então, obtido pela equação:

$$FR_i = (A_{i,1} * DP_1) + (A_{i,2} * DP_2) + \cdots + (A_{i,n} * DP_n) = \sum_{j=1}^n (A_{i,j} * DP_j) \quad (2)$$

No entanto, visto que os vetores {FR} e {DP} não apresentam somente valores algébricos, a análise de cada matriz de projeto pode necessitar de utilização de conhecimento em diversas áreas.

Analisando a matriz de projeto, é possível definir a qualidade de um projeto nas três categorias disponíveis:

- Projeto Acoplado (*Coupled Design*): Num Projeto Acoplado, não é satisfeito o 1º Axioma da AP, pelo que os FRs dependem uns dos outros, tornando-se, então, mais difícil, ou até mesmo impossível, a obtenção de uma solução válida (exemplo na equação 3). Nesta equação todos os DPs influenciam todos os FRs, podendo mesmo não existir solução física para o problema.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

- Projeto Desacoplado (*Uncoupled Design*): Um Projeto Desacoplado satisfaz o 1º Axioma, pelo que todos os FRs são independentes uns dos outros. A Matriz de Projeto, neste caso, é uma Matriz Diagonal. O cumprimento de cada FR dependerá unicamente de um DP, pelo que não é necessário compromisso algum para a satisfação dos FRs. No âmbito da simplificação do projeto, este é um projeto ideal (exemplo na equação 4).

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & A_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & A_{3,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

- Projeto Desacoplável (*Decoupled Design*): Num Projeto Desacoplável existe a particularidade dos FRs terem de ser alcançados de acordo com uma sequência específica de atribuição de valores aos respetivos DPs. Sucede quando a Matriz de Projeto é triangular superior ou inferior (matriz quadrada onde todos os elementos abaixo ou acima da diagonal são iguais a zero). Um projeto Desacoplável não é inválido, simplesmente será mais difícil desenvolver um sistema que cumpra todos os FRs. O 1º Axioma só será satisfeito se houver uma correta sequência de definição dos DPs para satisfazer os FRs (exemplo na equação 5).

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & 0 & 0 \\ A_{2,1} & A_{2,2} & 0 \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Existe a possibilidade de, na definição de um projeto existirem mais DPs que FRs, o que se designa por projeto redundante. O que significa esta redundância na Teoria Axiomática?

Na equação 6 está presente a Matriz de um Projeto com 3 FRs e 4 DPs. Segundo esta equação, é possível satisfazer o FR3 recorrendo ao DP3 ou ao DP4. Esta redundância poderá apresentar dois projetos: um projeto em que o DP3 e o DP4 cumpram o FR3 ao mesmo tempo (redundância simultânea), ou um projeto que utilize DP3 em certas condições e DP4 noutras (redundância alternada).

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & & & \\ & X & & \\ & & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \\ DP4 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

## 2.5. Corolários e Teoremas

Com base nos Axiomas, podem ser deduzidos Teoremas e Corolários para servirem de regras mais específicas a serem cumpridas durante a aplicação desta Teoria. Os Corolários e Teoremas deduzidos por Suh serão apresentados em **ANEXO B**, no entanto, no âmbito deste trabalho, importa referenciar alguns que poderão vir a ser úteis no desenvolvimento do projeto:

**Teorema 1:** *Acoplamento devido a número insuficiente de DPs:* Quando o número de DPs for inferior ao número de FRs, o projeto será acoplado ou nem todos os FRs poderão ser satisfeitos.

**Teorema 2:** *Desacoplamento de um projeto Acoplado:* Quando um projeto for Acoplado devido a ter um maior número de FRs do que DPs, pode ser desacoplado através da adição de novos DPs até igualar o número de FRs.

**Teorema 3:** *Projeto Redundante:* Quando existem mais DPs do que FRs, o projeto é Redundante ou Acoplado.

**Teorema 4:** *Projeto Ideal:* Num projeto ideal, o número de FRs é igual ao número de DPs.

**Teorema 5:** *Necessidade de novo projeto:* Quando um dado grupo de FRs for alterado pela adição de um novo FR ou pela substituição de um FR por um novo FR ou for substituído por um novo grupo de FRs, a solução obtida para a satisfação do grupo de FRs inicial não poderá satisfazer o novo grupo de FRs. Portanto será necessário encontrar a solução do novo projeto.

**Teorema 12:** *Soma da Informação* – Uma soma de Informação é também Informação, assegurando que as probabilidades condicionais são utilizadas quando os DPs não forem estatisticamente independentes.

**Teorema 16:** *Igualdade da validade do Conteúdo de Informação* – Todo o Conteúdo de Informação relevante para o projeto tem a mesma importância independentemente da sua origem física e não poderá ser aplicado nenhum tipo de peso.

**Teorema 17:** *Importância da tomada de decisão a altos níveis* – A qualidade de um projeto depende da seleção de FRs e do processo de mapeamento entre domínios. Decisões incorretas feitas a um nível de projeto elevado não poderão ser retificadas por decisões efetuadas a níveis inferiores do projeto.

**Teorema 18:** *Melhor Projeto para grandes sistemas* – O melhor projeto, de um grupo de projetos, pode ser escolhido se for conhecido, a priori, o grupo de FRs que o sistema terá de satisfazer.

**Teorema 22:** *Complexidade de grandes sistemas* – Um grande sistema não é necessariamente complexo se tiver uma grande probabilidade de satisfazer os FRs especificados para o sistema.

**Teorema 23:** *Qualidade do Projeto* – A qualidade do Projeto de um grande sistema é determinada pela qualidade da base de dados utilizada, da seleção dos FRs e do processo de mapeamento entre domínios.

## 2.6. Informação

Até agora, foi discutido o Axioma da Independência (1º Axioma) relativo aos FRs e à sua relação com os DPs no projeto. O Axioma da Informação (2º Axioma) que utiliza a quantificação da complexidade do projeto é de igual importância. Nesta secção irá ser feita uma descrição detalhada do modo de cálculo do Conteúdo de Informação.

O resultado final de um projeto é conhecimento a ser usado em operações de produção, manufatura ou em outro tipo de operações que levem à criação do objeto projetado. Este conhecimento poderá ser apresentado na forma de desenhos, equações, especificações de material, instruções de operação, *software*, entre outros.

Por exemplo, é fácil desenhar um veio e definir as suas dimensões e tolerâncias, no entanto, para se proceder à sua produção, será necessário definir os processos de maquinaria e as máquinas que os irão executar. Se for selecionada uma máquina errada, o processo de maquinaria poderá ser muito complexo, implicando, assim, um grande conteúdo de informação. Por outro lado, se a ferramenta de produção for correta para a função a desempenhar, a produção do equipamento será mais fácil e com menores custos associados. Isto levanta algumas questões que deverão ser respondidas antes de se abordar o conteúdo de informação na Teoria Axiomática: O que é uma máquina errada? Como se pode medir quantitativamente o conteúdo de informação de um projeto? Como se pode selecionar o melhor projeto com a medida de informação? Como é que o projeto afeta a produção?

É relativamente fácil pensar em complexidade de uma maneira qualitativa, mas torna-se mais complicado associar valores (maneira quantitativa). A complexidade está associada à dificuldade em executar uma tarefa. De novo no problema do veio, qual

seria a resposta à pergunta “qual a quantidade de informação associada ao veio?” Se for considerado o arranjo atómico, a impureza do material usado, a geometria ou a cor, poderão ser obtidos diferentes avaliações de informação. Imaginando que o comprimento do veio é 4 m. Qual a quantidade de informação presente? Existe mais informação num veio de 4 m ou num veio de 2 m? Não se pode responder a estas questões sem saber a tolerância no domínio funcional. Se para cumprir a tolerância referida, for necessário que o comprimento do veio tenha  $4 \pm 0,1$  m, então sabemos qual a precisão de medida a ser utilizada para a satisfação do FR; ou seja, temos informação sobre o FR do comprimento do veio. Neste caso a informação está relacionada com a probabilidade da medição do comprimento do veio de acordo com as tolerâncias especificadas. Esta observação pode ser generalizada no que diz respeito ao conteúdo de informação do veio: *Informação é a medida da probabilidade de satisfazer um dado FR a um certo nível da hierarquia de FRs.*

Se a medida do veio tiver de ser 4 m com desvio limite de 0,0001 m, então a utilização de uma fita métrica habitual imporá uma baixa probabilidade de sucesso. De modo a ter sucesso, terão de ser utilizados dispositivos de medida mais sofisticados. Este caso sugere que *a noção de informação na teoria Axiomática de Projeto está diretamente relacionada com a probabilidade de o FR ser cumprido.*

O cálculo de informação necessário ao projeto é efetuado no Domínio Funcional, e não no Domínio Físico. No caso de um único FR a informação é definida pela Equação 7:

$$I = \log_2 \left( \frac{\text{System Area}}{\text{Common Area}} \right) \quad (7)$$

Em que a *System Area* (Gama de sistema) representa a área da função densidade de probabilidade (fdp) do FR e a *Common Area* (Área Comum) é a intersecção da *System Area* com o *Design Range* (Gama de projeto) ou intervalo de aceitação do FR no projeto em avaliação. A Gama do Projeto apresentada na Figura 4 indica o intervalo em que o sistema poderá funcionar no domínio funcional, independentemente do tipo de sistema considerado. Em particular para o cálculo da Informação pode usar-se a Lógica Difusa, que irá ser abordada mais à frente.

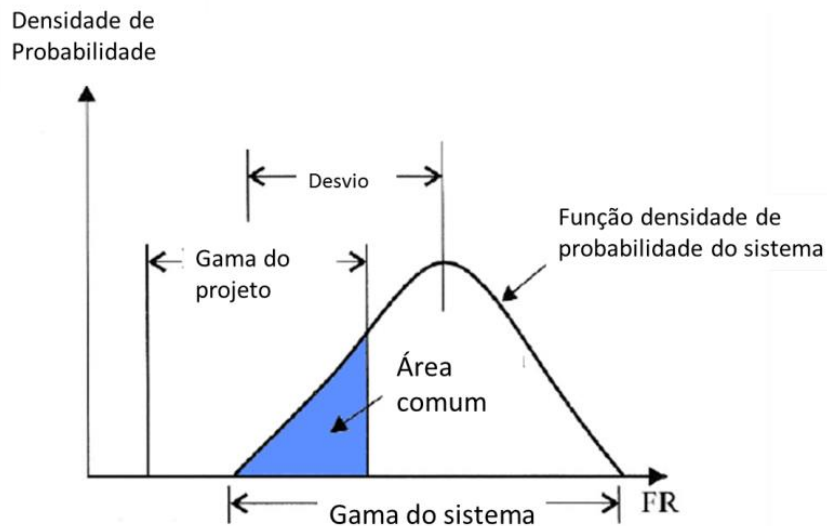


Figura 4 - Área da fdp de um sistema (Suh, 2001)

A informação é quantitativamente o logaritmo da probabilidade do cumprimento do FR. Se o FR for “Garantir a transmissão de binário numa distância de 4 m com desvio limite de 0,01 m”, então a probabilidade de se encontrar dentro das tolerâncias definidas define a informação. Se for assumida uma densidade de probabilidade uniforme ao longo do comprimento do veio, a probabilidade,  $p$ , de ser produzido um veio aceitável é dada pela razão da tolerância com a dimensão:

$$p = \frac{2 * (0.1 \text{ m})}{4 \text{ m}} = \frac{1}{20} \quad (8)$$

O produto do desvio limite (0.1 m) por 2 vem do facto do limite ser aplicado tanto a somar como a subtrair do valor ideal a ser atingido. O conteúdo de informação é, então, definido em termos de probabilidade como:

$$I = \log_2 \left( \frac{1}{p} \right) = \log_2 20 = 4.32 \quad (9)$$

Ou mais genericamente:

$$I = \log_2 \left( \frac{L}{2 * \Delta L} \right) = \log_2 \left( \frac{1}{p} \right) \quad (10)$$

Em que  $L$  é o comprimento,  $\Delta L$  é o desvio limite aceitável no comprimento e  $p$  é a probabilidade.

A definição de informação dada nesta última equação é a mesma usada na teoria de informação (Shannon e Weaver, 1949; Brillouin, 1962).

Quando um dado projeto envolve diversas tarefas independentes com probabilidades associadas, a probabilidade total é o produto das probabilidades de todos os eventos associados. Isto é, a probabilidade total de eventos independentes é multiplicativa. Portanto, uma definição logarítmica é usada de modo a que a medida do conteúdo de informação seja aditiva.

Generalizando a Equação 8, o conteúdo de informação associado a um dado FR poderá ser pensado como o logaritmo da razão entre a área do sistema e a área da tolerância, assumindo que a tolerância está uniformemente distribuída ao longo do sistema. O Cálculo de Informação poderá então ser reescrito como:

$$I = \log_2 \frac{\textit{sistema}}{\textit{tolerância}} \quad (11)$$

Onde a razão de *tolerância* e *sistema* define a probabilidade de sucesso. Esta definição adimensional da informação é particularmente útil na projeção e construção de sistemas, visto que, por vezes, se tem de tratar de diversas variáveis e quantidades dimensionais (comprimento, temperatura, voltagem, corrente, velocidade). No domínio probabilístico, todas as variáveis, independentemente da sua origem física, podem ser tratadas de igual modo.

O Conteúdo de Informação associado aos FRs de um projeto Desacoplável poderá ser obtido somando a informação obtida para cada FR sujeito à satisfação dos FRs que de acordo com a matriz de projeto devem ser satisfeitos antes, obtida através do cálculo de probabilidade condicionada. Considere-se a matriz de um projeto Desacoplável:

$$A = \begin{bmatrix} X & & \\ X & X & \\ X & X & X \end{bmatrix}$$

A informação será dada por:

$$I = \log_2 \frac{1}{p(FR_1) * p(FR_2|FR_1) * p(FR_3|(FR_1, FR_2))} \quad (12)$$

Visto que o FR<sub>1</sub> é independente, que o FR<sub>2</sub> está sujeito à satisfação do FR<sub>1</sub> antes e que o FR<sub>3</sub> depende dos outros dois FRs serem cumpridos anteriormente.

No entanto, no caso de ser um projeto acoplado o conteúdo de informação não poderá ser obtido desta maneira visto que um DP poderá influenciar vários FRs. O Conteúdo de Informação dependerá do caminho escolhido para variar os DPs. Conseqüentemente para cumprir um conjunto de FRs, a informação associada a um projeto Acoplado será maior do que a associada a um projeto Desacoplável, que por sua vez, será maior que a informação associada a um projeto Desacoplado.

## 2.7. Conjuntos Vagos

Para a definição da veracidade de uma declaração, é tipicamente utilizada uma abordagem da Lógica Clássica. Este tipo de lógica apresenta os dados num formato binário (0 e 1), o que limita a possibilidade de avaliação de sistemas que sejam definidos de modo linguístico, em que por vezes não há uma definição exata dos parâmetros. Na Lógica Difusa (Conjuntos Vagos) os elementos têm graus de pertença a uma proposição. Em muitas situações a função densidade de probabilidade de um FR não é conhecida, mas é possível usar uma estimativa. Esta situação é corrente em novos projetos em que não há histórico de funcionamento, pelo que a quantificação da fdp não é possível. Nestes casos, a utilização de conjuntos vagos associados à Teoria Axiomática de Projeto permite quantificar a informação.

Na aplicação dos Conjuntos Vagos, uma declaração poderá ser analisada sem limites concretamente definidos, o que poderá levar a análises subjetivas. Preferencialmente, deve ser ouvida a opinião de peritos na área de modo a reduzir o grau de subjetividade. Em outras situações, como declarações linguísticas de apreço ou preferência de indivíduos a margem de variação será elevada.

Em Lógica Difusa, as declarações vagas são atribuídas a conjuntos vagos. Assumindo que a declaração  $P$  é atribuída ao Conjunto Vago  $A$ , o valor de pertença da declaração,  $T(P)$ , será obtido por:

$$T(P) = \mu_A(x) \quad (13)$$

onde  $\mu_A$  é o valor de pertença de  $x$  ao Conjunto  $A$ , que é igual ao grau de veracidade da declaração  $P$ :  $x \in A$ . Este valor de pertença será um valor entre 0 e 1. Considere-se o Exemplo 1.

- **Exemplo 1:**

Numa Autoestrada Portuguesa existem limites de velocidade impostos pela Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR) para condições de tráfego normais. Para automóveis ligeiros ou motociclos, o limite mínimo é de 50km/h e o limite máximo é de 120 km/h, salvo em troços específicos em que estes limites poderão ser ligeiramente inferiores atendendo às condições rodoviárias (e.g. obras ou anomalias no piso da rodovia). Na seleção de um automóvel ligeiro, ou de um motociclo, para efetuar travessias diárias ao longo de 200 km numa Autoestrada Portuguesa, o seu comprador terá de ter em atenção estes limites impostos, fazendo, então, a escolha consoante a velocidade máxima atingida pelo veículo. Definindo, então, **A** como “Escolha correta do veículo a percorrer diariamente 200 km em Autoestrada nacional”, obtém-se:

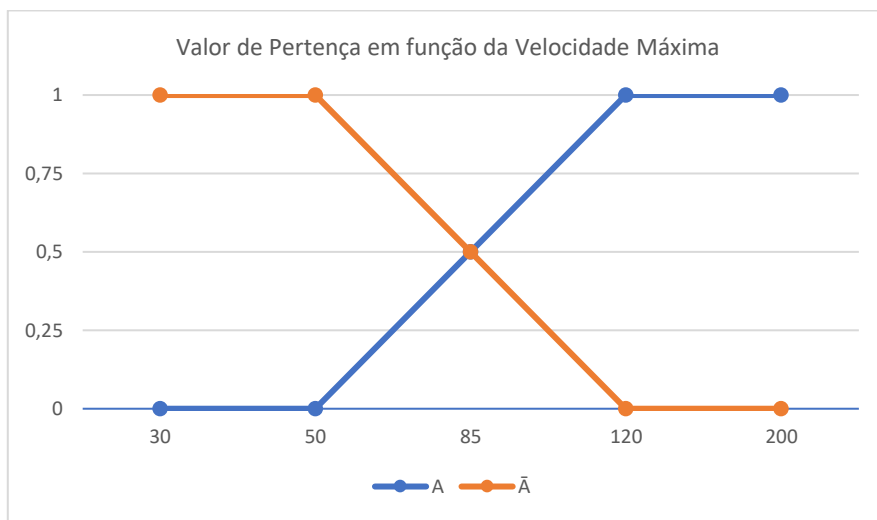


Figura 5 - Valor de Pertença para a Escolha do Automóvel Ligeiro com base na Velocidade Máxima

De acordo com o Gráfico apresentado, existem três áreas de interesse para o consumidor efetuar a sua escolha:

- Um automóvel ligeiro ou motociclo com uma velocidade máxima em piso plano inferior a 50 km/h: Apresenta um valor de pertinência de **1** ao conjunto “Escolha Errada”.
- Um automóvel ligeiro ou motociclo que apresente uma velocidade máxima em piso plano entre os 50 e os 120 km/h: Apresenta valores de pertinência entre 0 e 1 para ambos os conjuntos.
- Um automóvel ligeiro ou motociclo com uma velocidade máxima em piso plano superior a 120 km/h: Apresenta um valor de pertinência de **1** ao conjunto “Escolha Correta”.

*Tendo em conta que os valores apresentados para a velocidade máxima de cada viatura foram obtidos em plano horizontal, existe a possibilidade de uma viatura, que apresenta velocidade máxima superior a 50 km/h, devido à sua carga e ao plano inclinado de segmentos da rodovia, não conseguir atingir a velocidade mínima descrita por lei, constituindo, então, uma infração rodoviária.*

*De acordo com esta avaliação, o comprador poderá adquirir um automóvel ligeiro ou um motociclo com velocidade superior a 50 km/h e inferior a 120 km/h, sabendo que poderá não se encontrar na plenitude das capacidades de atingir o valor mínimo descrito por lei. No entanto, se o comprador decidir adquirir uma viatura com velocidade máxima superior a 120 km/h e se for sujeito às mesmas condições rodoviárias e de transporte descritas anteriormente, estará assegurado o cumprimento do limite mínimo de velocidade permitido na autoestrada, pois em nenhuma situação o automóvel não será capaz de atingir os 50 km/h.*

O objetivo principal da utilização de Lógica Difusa é criar fundações teóricas sobre informação imprecisa de modo a atingir conclusões de maneira análoga ao Sistema Clássico. Esta abordagem será realizada neste trabalho para o cálculo da informação de FRs. A utilização da Lógica Difusa, apresenta também a possibilidade de entrar com conhecimento não quantificável ou incompleta no processo de tomada de decisão.



### 3. Estado da Arte VENT-SUP

A utilização de VENT-SUP empregues em operações militares, remonta à 2ª Guerra Mundial onde, no desenvolvimento da bomba atómica, os VENT-SUP eram utilizados para efetuar testes de radioatividade após uma detonação, de modo a ser estudado o alcance da radiação, sem intervenção humana (Graham, 2008). Um dos primeiros objetivos do emprego de VENT-SUP foi serem utilizados como alvos navais para treino de guarnições de navios e para exercícios de artilharia. Após os anos 70, os VENT-SUP começaram a ser empregues em missões de Guerra de Minas com o propósito de eliminar o risco de vida humana no decorrer de uma Operação de Limpeza de Minas (Martin, 2011). Mais recentemente, com os avanços tecnológicos, existe cada vez mais o interesse de desenvolver VENT-SUP para desempenharem operações de combate ao terrorismo e operações de vigilância e patrulhamento costeiro (Yan, Pang, Sun, & Pang, 2010). O desenvolvimento de VENT-SUP para o cumprimento das Operações mencionadas passa pela definição da conceção do Veículo em modular ou não-modular. Por um lado, uma conceção modular permite que o VENT-SUP tenha capacidade de execução de qualquer Operação que lhe seja atribuída. No entanto, requerer maior desenvolvimento de modo a permitir mudar os equipamentos e sensores presentes no VENT-SUP de modo a cumprir a missão adstrita, resultando num nível de Prontidão Não-Imediata, no caso de ser necessário o seu emprego numa situação de emergência. Por outro lado, uma conceção não-modular permite o emprego do VENT-SUP sem serem necessárias alterações de equipamentos e sensores, resultando num nível de Prontidão de emprego Imediato, mas limitado à capacidade de atuação nas missões propostas.

Atualmente, existem diversos sistemas de VENT-SUP utilizados por Forças Armadas de diversos países, com capacidade de ação em vários cenários, onde se destacam (Graham, 2008), (Yan, Pang, Sun, & Pang, 2010), (Martin, 2011):

- Guerra de Superfície (*ASuW – Anti Surface Warfare*);
- Guerra Anti-Submarina (*ASW – Anti-Submarine Warfare*);
- Guerra Eletrónica (*EW – Electronic Warfare*);
- Guerra de Minas (*MCM – Mine Countermeasures*);

- Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (*ISR – Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*);
- Busca e Salvamento Marítimo (*SAR – Search and Rescue*);
- Antiterrorismo.

Sendo esta dissertação no âmbito da comparação e escolha das máquinas principais do sistema propulsor a aplicar no VENT-SUP-EN, torna-se necessário apresentar os sistemas de propulsão naval disponíveis a serem aplicados ao VENT-SUP em desenvolvimento.

### **3.1. Sistemas de Propulsão Naval**

Dá-se o nome de Instalação Propulsora de um navio ao conjunto de máquinas e aparelhos destinados à sua propulsão. Existem diversos tipos de Instalações Propulsoras principais, sendo utilizados neste trabalho para comparação apenas as Instalações a Máquinas de Combustão Interna Alternativas e Rotativas e as Instalações Propulsoras Elétricas visto que existe uma diretiva do Estado Maior da Armada (EMA), em documento Reservado, que limita a tecnologia dos equipamentos e sistemas a serem aplicados a novos meios da Marinha Portuguesa àqueles que já se encontram em operação, por razões logístico-administrativas.

#### **3.1.1. Instalação Propulsora a Vapor**

Dado que as máquinas alternativas a vapor deixaram de ser utilizadas como máquinas propulsoras dos navios, só serão consideradas máquinas rotativas (Turbinas) a vapor para este tipo de Instalação Propulsora. Para a produção de Energia Mecânica através da Turbina, será necessário aplicar vapor de água a altas pressões. Este vapor de água é obtido através da passagem de água numa caldeira, saindo do coletor de vapor através do sobreaquecedor (Figura 6). Este vapor, sobreaquecido, vai para a Turbina, onde a Energia Térmica é convertida e aproveitada como Energia Mecânica. O vapor que sai da Turbina passa ainda por um Condensador, onde é arrefecido e condensado com água do mar. A água proveniente da condensação do vapor é aspirada pela bomba e comprimida através de vários permutadores de calor para o tanque da purga da água de alimentação, onde é aquecida e purgada, ou seja, é separada do ar natural dissolvido ou arrastado ao longo do circuito. A água de alimentação é, então, aspirada pela bomba

de reforço e comprimida para a aspiração da bomba de alimentação principal que, por sua vez, a comprime através do economizador, para a caldeira. No economizador, a água de alimentação é pré-aquecida antes de entrar no coletor de vapor da caldeira.

Quando necessário, poderá ser adicionada água ao sistema, pelo condensador, vinda dos tanques de reserva de água de alimentação, de modo a substituir água perdida ao longo do circuito.

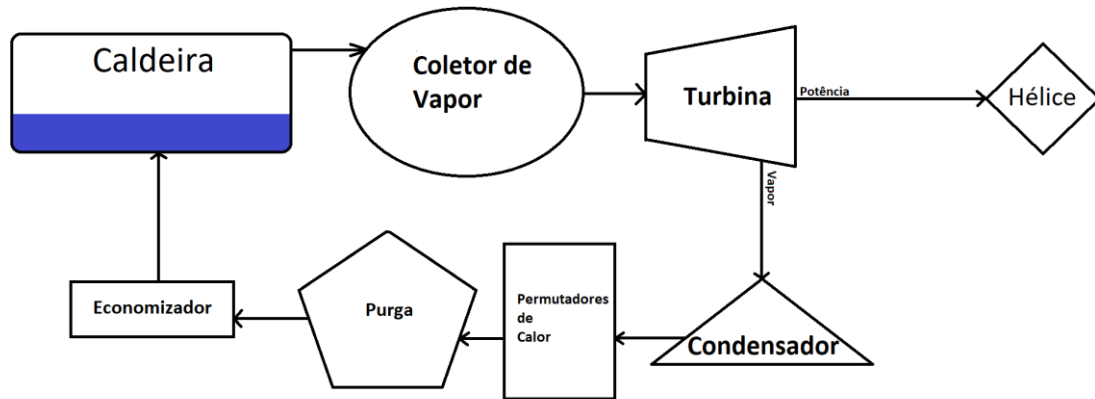


Figura 6 - Diagrama de Instalação Propulsora a Vapor

Este tipo de Instalação Propulsora poderá ser, também, designado por Instalação Propulsora de Combustão Externa, visto que a Combustão do fluido de trabalho ocorre fora do Motor Propulsor.

Esta Instalação Propulsora já não se encontra em utilização na Marinha Portuguesa, pelo que não será considerada como uma opção viável a ser aplicada no VENT-SUP-EN.

### 3.1.2. Instalação Propulsora de Combustão Interna

A utilização de Máquinas de Combustão Interna em navios como Motores Principais de Instalações Propulsoras é a mais comum, tanto no sector militar, como no sector civil. Por Máquinas de Combustão Interna poderão ser interpretados, tanto motores de funcionamento alternativo como de funcionamento rotativo. Os motores de funcionamento alternativo poderão ser com base nos Ciclos de Potência Diesel ou Otto. No entanto, a Convenção para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (**SOLAS** - *Safety of Life at Sea*) impede a utilização de combustíveis com pontos de inflamação inferiores a 65 °C (caso da Gasolina) pelo que, por razões de segurança, só irão ser abordados casos de aplicação de motores Diesel ao VENT-SUP-EN.

Numa Instalação Propulsora de Combustão Interna Alternativa, as máquinas principais serão motores Diesel que transformam a Energia Química presente no combustível em Energia Mecânica necessária à propulsão do navio, seguindo o Ciclo de Potência Diesel:

- I. O combustível é injetado numa quantidade controlada a uma pressão elevada no cilindro criando uma mistura de ar e combustível;
- II. A mistura é comprimida dentro de um cilindro do motor com a ajuda do movimento ascendente de um êmbolo;
- III. A combustão da mistura ocorre às elevadas temperaturas de mistura provocadas pela compressão. Como resultado, é obtido Calor que vai aumentar a pressão no cilindro. No arranque são usadas de velas de incandescência para auxiliar a combustão.
- IV. O aumento súbito da pressão no cilindro vai empurrar o êmbolo, que irá transformar este movimento linear em movimento rotacional no veio de manivelas.

Estes movimentos podem ser traduzidos em 2 ou 4 tempos:

- 2 Tempos (1 Rotação do Veio de Manivelas = 1 Tempo Potente)
  - i. Tempo de Sucção e Compressão – Movimento descendente do êmbolo para fazer a admissão de ar novo e comprimir a mistura ar-combustível;
  - ii. Potência e Evacuação – Movimento de Cima para Baixo devido a uma explosão na câmara de combustão seguida da evacuação dos gases resultantes dessa combustão.

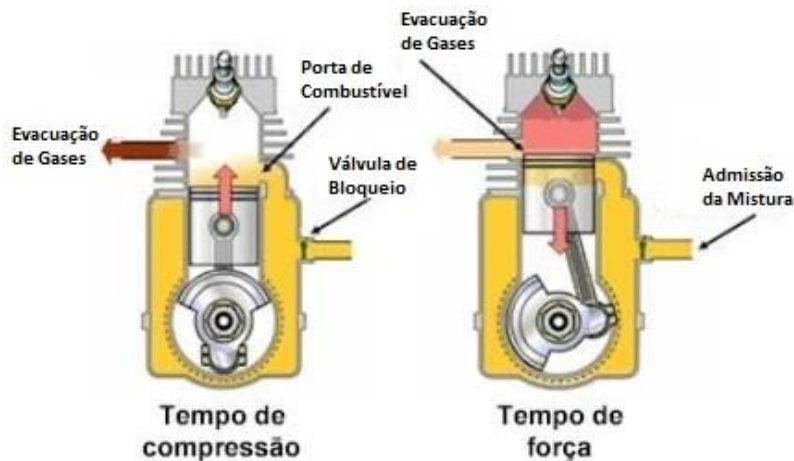


Figura 7 - Motor Diesel a 2 Tempos

- 4 Tempos (2 Rotações do Veio de Manivelas = 1 Tempo Potente)
  - i. Tempo de Admissão – Movimento vertical descendente do êmbolo de modo a ser feita a admissão de ar novo;
  - ii. Tempo de Compressão – Movimento ascendente do êmbolo para comprimir a mistura;
  - iii. Tempo Potente – Dá-se a combustão da mistura no interior do cilindro em que o aumento de pressão obriga o êmbolo a descer, sendo este tempo que produz trabalho sobre o exterior, designado por tempo motor;
  - iv. Tempo de Evacuação – A subida do êmbolo e a abertura da válvula de escape irá obrigar à saída dos gases resultantes da combustão.

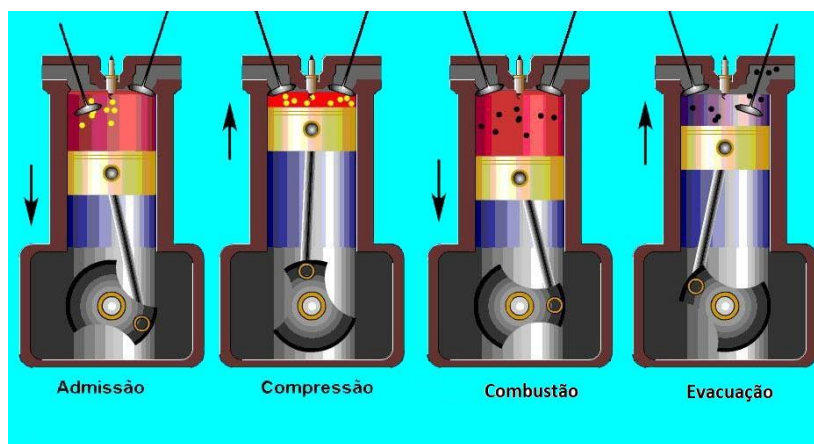


Figura 8 - Motor Diesel a 4 Tempos (adaptado de MotorCombustaoInterna.Blogspot.com)

Este processo é repetido continuamente de modo a poder manter os níveis de potência indicados nas especificações do motor.

Os Motores de Combustão Interna Alternativos são o Sistema Propulsor Naval mais utilizado atualmente, pela sua facilidade de implementação, manutenção e operação, sendo uma das vantagens da sua utilização o facto de ser um Sistema Propulsor com prestações razoáveis para os diversos níveis de potência a serem obtidos. Tipicamente, um Motor de Combustão Interna Alternativo apresenta valores de rendimento térmico superiores a 25%, podendo atingir 45%. Para efeitos de avaliação, posteriormente serão considerados valores de rendimento médios, ou seja, entre os 30% e os 40%, perfeitamente aplicáveis a Motores de Combustão Interna Alternativos com valores de potência de até 450 kW.

Por outro lado, uma Instalação Propulsora de Combustão Interna Rotativa utiliza como Motor Propulsor Turbinas de Combustão Interna, mais frequentemente designadas por Turbinas a Gás. Esta designação refere-se ao fluido de trabalho utilizado, que é uma mistura de gases provenientes da combustão, a altas temperaturas e pressões, de um combustível. Os gases irão fazer rodar uma Turbina semelhante à utilizada num Sistema a Vapor, onde se transforma a energia química do combustível em Energia Mecânica necessária à propulsão do navio. Esta energia é em parte usada no acionamento do compressor que comprime o ar necessário à combustão.

No âmbito da propulsão de navios, os combustíveis utilizados são tipicamente um dos seguintes: Gás de Petróleo Liquefeito (GPL), Gás Natural Liquefeito (GNL), Diesel ou Querosene.

O funcionamento das turbinas segue o Ciclo Termodinâmico de Brayton que passa pela utilização de um fluido gasoso de trabalho, normalmente o próprio ar, a altas pressões, obtidas através de combustão, para mobilizar a turbina constituída por pás angulares. Esta secção da Turbina poderá estar diretamente acoplada ao veio propulsor, através de Caixas Redutoras, pois a Turbina apresenta valores de rotação bastante elevados. Esta secção está normalmente ligada à secção de Compressão fazendo uso de uma parte da Energia Mecânica obtida para fazer a admissão de ar comprimido.

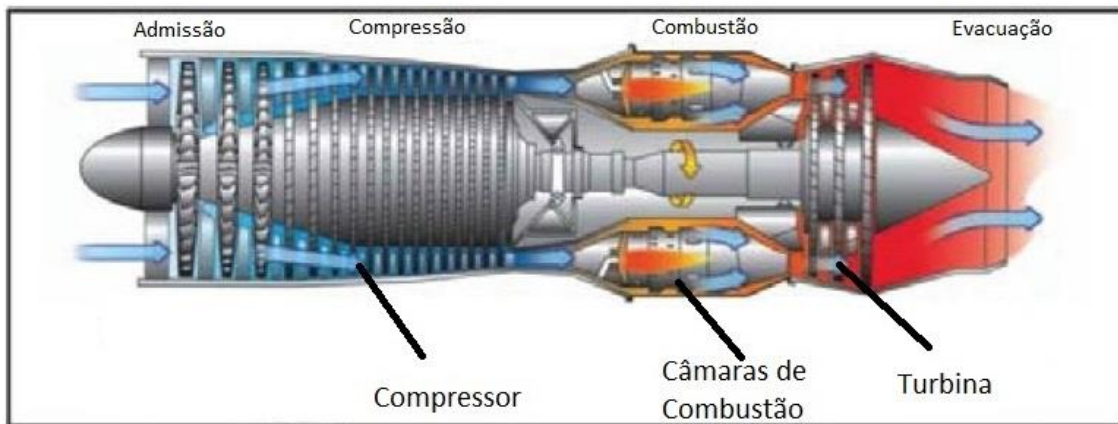


Figura 9 - Turbina a Gás

Por terem rotações elevadas e apresentarem um baixo rendimento térmico, especialmente a baixas velocidades, os sistemas de propulsão que utilizam Turbinas, normalmente têm outros tipos de Instalações Propulsoras associadas. É o caso das Fragatas da Classe *Vasco da Gama* da Marinha Portuguesa (MEKO 200PN) que utilizam uma Instalação Propulsora Combinada com Motores Diesel e Turbinas a Gás (CODOG – *Combined Diesel or Gas*). Para transito comum são utilizados os Motores a Diesel com uma velocidade máxima de 20 nós. No entanto, para elevados níveis de potência, são utilizadas as Turbinas a Gás L&M 2500, cada uma com potência disponível a rondar os 25 MW, com capacidade de atingir velocidades na ordem dos 32 nós. No caso de navios de passageiros, a razão principal para a instalação de Turbinas a Gás é permitir a redução de emissões de gases poluentes em zonas ambientalmente sensíveis e em portos.

Em relação aos Motores Diesel, as Turbinas:

- Ocupam um menor espaço para níveis de potência semelhantes;
- Apresentam menores níveis de emissões atmosféricas de poluentes;
- Têm capacidade para atingir níveis de potência mais elevados a altas velocidades de funcionamento, apresentando um bom rendimento nestas situações.

No entanto:

- Apresentam um consumo de combustível mais elevado;
- Atingem um baixo rendimento termodinâmico para baixas velocidades de funcionamento, o que leva a baixos níveis de potência obtidos nessa situação;
- Apresentam uma baixa flexibilidade para missões que requeiram constantes variações de níveis de potência obtidos.

Os Motores de Combustão Interna Rotativos apresentam valores de Rendimento Térmico inferiores aos Alternativos, normalmente entre os 15% e os 25%.

### **3.1.3. Instalação Propulsora Elétrica**

Uma Instalação Propulsora Elétrica é um Sistema onde o Motor Propulsor é Elétrico e a alimentação pode ser efetuada recorrendo a um banco de baterias. Este tipo de Instalação Propulsora é utilizado nos submarinos convencionais, quando em imersão, se não utilizarem sistemas de produção de Energia Elétrica ou de Propulsão Independentes do Ar (AIP – *Air Independent Propulsion*).

Tipicamente, navios que tenham este tipo de Instalação Propulsora, têm também um Sistema de Propulsão de Combustão Interna Alternado (motor Diesel) para fazer trânsitos à superfície e para acionar os geradores de Energia Elétrica utilizados para o carregamento das baterias.

A propulsão elétrica dependente de baterias tem vindo a ser desenvolvida a partir do século XIX, sendo aplicada em pequenas embarcações com baterias de chumbo-ácido. Com o desenvolvimento da tecnologia de armazenamento de Energia Elétrica, através do desenvolvimento de baterias de iões de lítio, e com as crescentes preocupações ambientais, a propulsão elétrica a bordo de navios da Marinha Mercante tem sido cada vez mais utilizada. A bordo de navios das Marinhas Militares, devido a requisitos impostos no desempenho das suas funções, e.g. navios draga-minas a efetuar operações de dragagem de minas ativadas por influências magnéticas, e por necessitar de uma grande quantidade de baterias para manter os níveis de autonomia semelhantes aos obtidos por Máquinas de Combustão Interna, não é tão comum encontrar sistemas propulsores exclusivamente elétricos. Em navios de Guerra que façam uso de Motores Elétricos como motores propulsores é comum encontrar sistemas de propulsão Diesel-Elétrico ou Turbo-Elétricos que irão ser abordados de seguida. Na última década tem-se verificado uma tendência para a aplicação de Sistemas Propulsores Elétricos, especialmente em navios que requeiram grandes oscilações de potência propulsora durante a sua operação ou que, por se encontrarem em áreas de proteção ambiental, apresentem limitações quanto à quantidade de Óxidos de Nitrogénio (NO<sub>x</sub>), produto da Combustão, a serem libertadas (Solem, Fagerholt, Erikstad, 2012).

O Motor Elétrico (Figura 10) baseia-se na indução Eletromagnética, ou seja, transforma energia elétrica em energia mecânica através da geração de uma força eletromotriz. Esta força eletromotriz, gerada com a alimentação elétrica do estator, irá movimentar o rotor composto por eletroímãs, que irão, tendencialmente, alinhar-se com o polo oposto presente no estator criado com a passagem de corrente. O Motor elétrico ser de funcionamento com AC ou com DC.

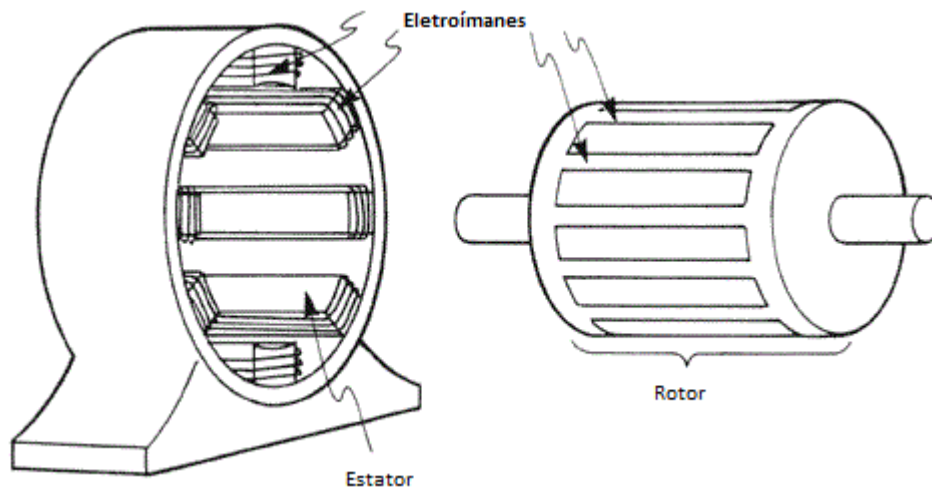


Figura 10 - Componentes de um Motor Elétrico

Perante os restantes tipos de motorização de sistemas propulsores navais, a motorização elétrica poderá vir a aumentar a autonomia da embarcação se associado a sistemas de produção de energia elétrica renováveis como é o caso de painéis fotovoltaicos. Estes sistemas estão dependentes da disponibilidade de radiação solar, pelo que funcionam menos bem em períodos de condições meteorológicas adversas (existência de nuvens e/ou tempestade) devido à diminuta capacidade de produção de energia elétrica nos painéis fotovoltaicos nestas condições (Duarte, 2007).

A aplicação de um Motor Elétrico como motor propulsor tem as seguintes vantagens devido às características inerentes a um motor elétrico que não se observam numa Máquina de Combustão Interna:

- Aumento do ciclo de vida útil do sistema propulsor devido aos baixos consumos de combustível, especialmente em navios que exijam diversos níveis de potência e tenham necessidade de variar frequentemente os valores de carga a serem aplicados ao veio;

- Possibilidade de otimização de cargas do motor gerador (Diesel ou Turbina a Gás) com o intuito de aumentar o rendimento na produção de Energia Elétrica;
- Possibilidade de utilização de motores geradores de altas velocidades sem necessidade de caixas redutoras, que reduzem o rendimento global;
- Maior flexibilidade na escolha do local onde aplicar os diversos equipamentos necessários ao controlo e utilização do Sistema Elétrico (Quadro Elétrico, Transformadores, Motor Gerador e Painéis de Controlo) visto que as ligações necessárias entre esses equipamentos são asseguradas por cabos elétricos, sem acoplamentos mecânicos (Figura 11);

No entanto, a aplicação deste sistema de propulsão também apresenta Desvantagens:

- Custo de Investimento Superior;
- Elevado número de equipamento elétrico como geradores, transformadores, drives e motores entre a origem de Energia Elétrica e o propulsor que aumenta as perdas de transmissão à carga máxima.

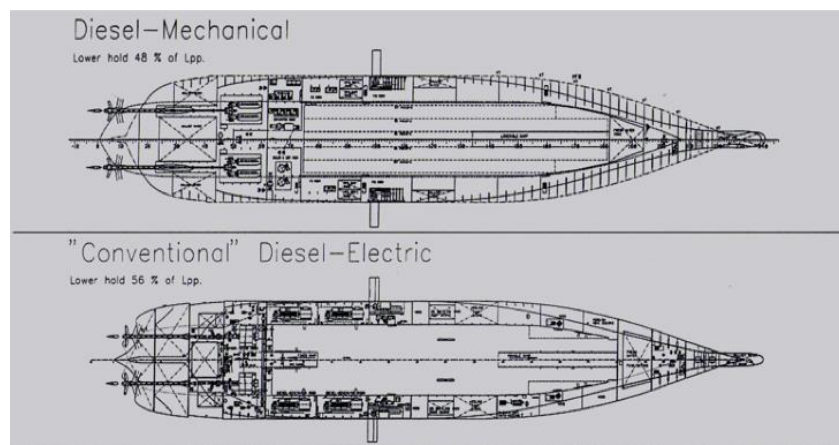


Figura 11 - Comparação do Espaço utilizado por Sistemas de Propulsão

As Células de Combustível (*Fuel Cells*) funcionam com um rendimento bastante superior ao obtido pela utilização de painéis fotovoltaicos, no entanto necessitam de utilizar Hidrogénio ( $H_2$ ), como combustível, e Oxigénio ( $O_2$ ), presente no ar atmosférico, para a produção de Energia Elétrica através da reação eletroquímica entre estes compostos, tendo como produto água ( $H_2O$ ). A utilização de *Fuel Cells* apresenta, no entanto, diversas limitações e requisitos, em particular o depósito do combustível: Por

se tratar de um gás com uma densidade extremamente baixa às condições PTN<sup>7</sup> de 0,08988 g/dm<sup>3</sup> (o equivalente a dizer que um grama de Hidrogénio ocupa 11 litros), para transportar Hidrogénio em capacidades suficientes para garantir um bom sistema propulsor será necessário usar depósitos de alta pressão ou depósitos isolados refrigerados a rondar os -250°C, nunca inferiores ao valor de -255°C devido à aproximação do ponto de fusão do Hidrogénio (-259,1°C). Os depósitos de pressão utilizados são normalmente cilíndricos e funcionam com pressões entre os 200 e os 700 bar<sup>8</sup> (Duarte, 2007).

Uma Célula de Combustível é um dispositivo eletroquímico que converte em eletricidade a energia proveniente da associação de moléculas. Enquanto os elétrodos presentes numa bateria reagem e alteram-se de acordo com o carregamento ou descarregamento da bateria, os elétrodos presentes numa célula de combustível são catalíticos, pelo que não são alterados ao longo do tempo de vida útil da célula (Duarte, 2007).

As células de combustível de Hidrogénio (Figura 12) consistem num eletrólito colocado entre dois elétrodos mais finos que são o ânodo (Hidrogénio) e o cátodo (Oxigénio). O combustível utilizado passa pelo ânodo onde é separado cataliticamente em protões e eletrões. Estes eletrões são forçados a atravessar um circuito externo, criando uma corrente elétrica, enquanto os protões passam pelo eletrólito para o cátodo, onde moléculas de oxigénio reagem com os eletrões e protões formando água, o único produto da reação. Tendo em conta que uma célula de combustível gera tipicamente correntes elétricas com tensão entre os 0,6 e os 0,9 Volts, são necessárias várias células de combustível em circuitos em série, e/ou em paralelo, para formar uma pilha de combustível (Duarte, 2007).

---

<sup>7</sup> Condições PTN: Condições de Pressão e Temperatura Normais (1 atm e 0°C)

<sup>8</sup> 1 bar = 100000 Pa ou 10<sup>5</sup> Pa

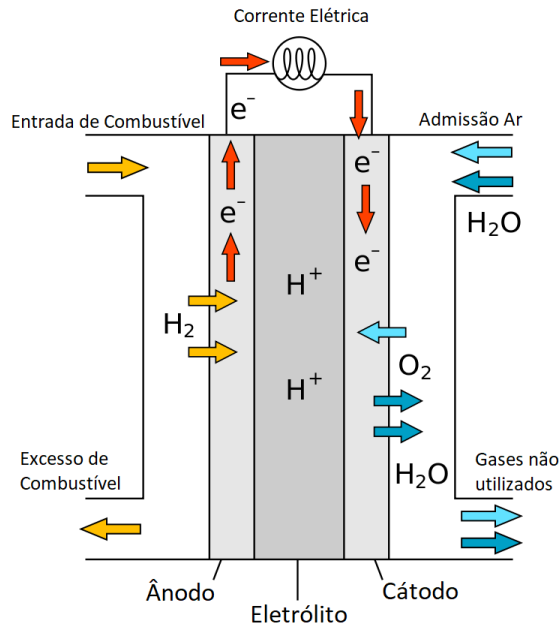


Figura 12 - Esquema do Funcionamento de uma Célula de Combustível a Hidrogénio (adaptado de Wikipedia)

As células de combustível podem ter rendimento próximo de 50%, precisando, no entanto, de aproveitar o calor resultante do processo. Estes valores de eficiência são superiores aos valores obtidos pelas Máquinas de Combustão Interna sem aproveitamento de calor ou turbocompressor, no entanto, as células de combustível de baixa temperatura que utilizam o Hidrogénio são tipicamente aplicadas em situações que exijam baixos níveis de potência e autonomia. Apesar do elevado rendimento das células de combustível, a sua utilização em embarcações de recreio é rara e geralmente não ultrapassa a potência de 5 kW, devido ao elevado preço das células e à limitada disponibilidade de produtos no mercado atual (Duarte, 2007).

Associados a um Motor Propulsor Elétrico existem também outros Sistemas de Propulsão que fazem uso de um Motor Gerador para a produção de Energia Elétrica a bordo: o Sistema Diesel-Elétrico e o Sistema Turbo-Elétrico que seguirão o seguinte diagrama de instalação:



Figura 13 - Diagrama de Instalação Propulsora de Funcionamento Misto

Uma Instalação Propulsora de Funcionamento Misto (Diesel-Elétrico ou Turbo-Elétrico) consiste na utilização de um Motor Elétrico como motor propulsor em que a Energia Elétrica necessária é fornecida por um Motor Gerador. Este Motor Gerador poderá ser uma Máquina de Combustão Interna Alternativa ou Rotativa não aplicada diretamente na propulsão, sendo a energia mecânica proveniente desta Máquina convertida em energia elétrica, pela utilização de um gerador, que por sua vez irá alimentar o Quadro de Distribuição. A Energia proveniente deste Quadro de Distribuição poderá alimentar todos os Sistemas Elétricos do navio incluindo o Sistema Propulsor composto por um Motor Elétrico responsável pelo acionamento do Hélice. A este Sistema poderão estar associados bancos de baterias para permitir o seu funcionamento quando o motor gerador se encontrar inativo. Este tipo de Instalação Propulsora também não depende de ligações mecânicas entre os seus equipamentos exceto, claro, a ligação entre o Motor Elétrico e o Hélice, e o motor gerador e o gerador.

Um Sistema Diesel-Elétrico consiste na utilização de um Motor Gerador Diesel que irá alimentar o Motor Elétrico Propulsor e, eventualmente, carregar Baterias. Este tipo de Instalação Propulsora poderá também ser considerada híbrida, por requerer mais do que um tipo de energia, neste caso Energia Mecânica obtida através da combustão de Diesel e Energia Elétrica obtida no gerador.

As Instalações Propulsoras Diesel-Elétricas são mais complexas do que uma tradicional Instalação Propulsora de Combustão Interna Alternativa devido a, além do Motor Propulsor (Elétrico) e do Motor Gerador (Motor Diesel), necessitar de quadros de distribuição, transformadores, conversores de frequência e, se aplicável, baterias para aumentar a sua autonomia e garantir o funcionamento do Motor Propulsor, quando o Motor Gerador não se encontre a trabalhar. Esta redundância à alimentação elétrica do Motor Propulsor, deverá ser considerada na análise dos Sistemas Propulsores como um aspeto positivo, visto que, no âmbito do VENT-SUP-EN, não existirá tripulação a bordo para reparar quaisquer problemas que surjam no Motor Gerador (Solem, 2015).

O Sistema Turbo-Elétrico, em vez de utilizar um Motor Diesel como gerador, utiliza uma Turbina a Gás. Este Sistema apresenta algumas diferenças face ao Sistema Diesel-Elétrico. O sistema tem igualmente Quadros de Distribuição, Transformadores e Conversores de Frequência e eventual aplicação de Baterias. Uma Instalação Propulsora

Turbo-Elétrica apresenta maior potência que um Motor Diesel do mesmo tamanho. Com a aplicação deste Sistema, normalmente são utilizados Motores Elétricos Propulsores maiores com maior potência.

#### **3.1.4. Instalação Propulsora de Energia Nuclear**

O desenvolvimento da Instalação Propulsora Nuclear Naval foi iniciado nos anos 40 do Século XX fazendo uso das grandes quantidades de energia, na forma de calor, emitidas na reação nuclear. De maneira semelhante à Instalação Propulsora a Vapor, esta Instalação irá fazer uso de uma Turbina a Vapor. A geração da energia térmica necessária para a obtenção de vapor é feita recorrendo a um reator nuclear. As quantidades elevadas de calor conseguidas no reator são transportadas por meio de um fluido especial, que circula num circuito fechado, para o gerador de vapor, onde a água de alimentação irá receber o calor, vaporizando-se e sendo então dirigida para a Turbina.

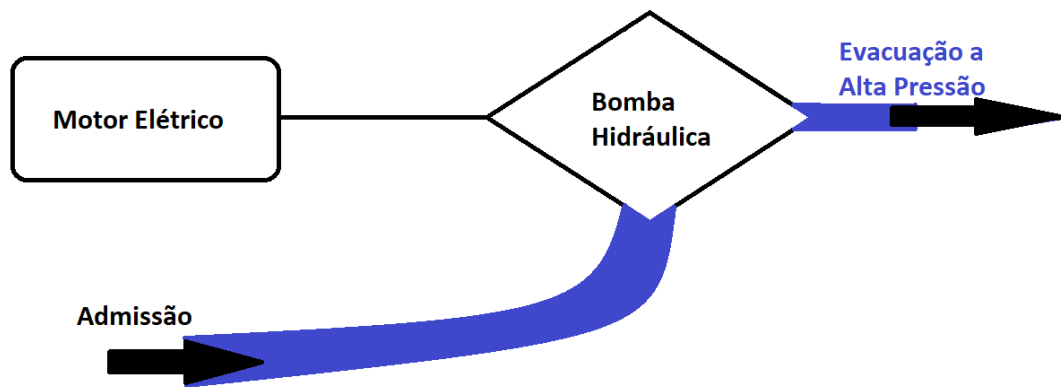
Este Sistema de Propulsão Naval traz elevados níveis de autonomia e potência sem requerer a utilização de ar atmosférico, como é o caso das Máquinas de Combustão Interna, pelo que é maioritariamente utilizado, por razões diferentes, em submarinos e navios porta-aviões.

Este tipo de propulsão não pode ser usado no VENT-SUP-EN, não só pelas potências em causa, mas também devido a uma diretiva do EMA, em documento Reservado, que impede a utilização de tecnologia nuclear na Marinha Portuguesa.

#### **3.1.5. Instalação Propulsora a Jato**

A Instalação Propulsora a Jato foi desenvolvido na primeira metade do Séc. XX, tendo sido aplicado, como hoje é conhecido, pela primeira vez em 1960 por Sir Bill Hamilton na subida do rio Colorado no *Grand Canyon* (Estado *Arizona*, Estados Unidos da América) utilizando três embarcações que se tornaram, até agora, as únicas a conseguir esse feito. O desenvolvimento deste Sistema Propulsor veio da necessidade de navegação em rios, na zona de residência de Sir Bill Hamilton, que até então não poderia ser feita com recurso aos Sistemas Propulsores que utilizavam hélice pois esta atingia o fundo dos rios.

As Instalações Propulsoras que utilizam Hidrojato, ou Jato de Água, estão mais associadas a embarcações pequenas que tenham necessidade de atingir elevadas velocidades e/ou que necessitem de operar em fundos baixos, pois somente a aspiração precisa de estar submersa. O princípio de funcionamento desta Instalação Propulsora consiste numa Bomba de fluxo axial, acionada por um Motor Principal, que aspira água junto à quilha, comprimindo-a e fazendo a sua descarga, a alta pressão, à popa do navio. Esta descarga resulta numa força reativa que irá propulsionar o navio. Esta Instalação tende a seguir o seguinte Diagrama:



*Figura 14 - Instalação Propulsora de funcionamento a Hidrojato*

Uma Instalação Propulsora baseada na Instalação a Jato é mais simples que uma Instalação que faça uso de uma Hélice, visto não apresentar partes móveis exteriores ao casco do navio (Altole, 2012).

O Hidrojato tem os seguintes componentes principais de modo a garantir o seu funcionamento como propulsor (Figura 15):

- A – Admissão;
- B – Impelidor;
- C – Conduto;
- D – Agulheta Orientável;
- E – Veio Motor (acionado pelo Motor Propulsor).

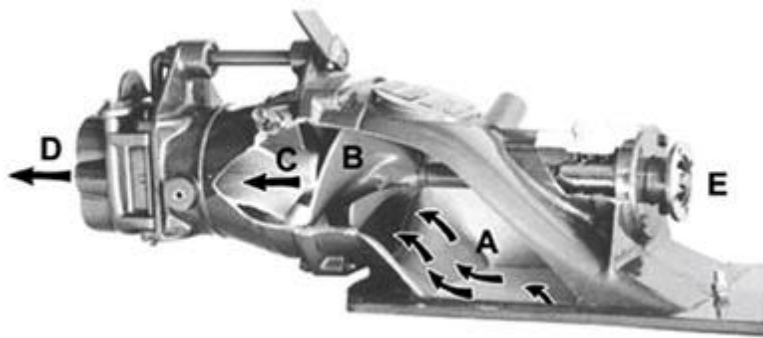


Figura 15 - Hidrojato

Os Sistemas de Hidrojato apresentam uma Agulheta de saída orientável pelo que se torna desnecessário o emprego de leme para manobrar. Como apenas a aspiração necessita de se encontrar submersa, este tipo de Instalação Propulsora é bastante utilizado em embarcações que necessitem de operar em fundos baixos. Este tipo de Instalação Propulsora apresenta, também, uma manobrabilidade superior às Instalações Propulsoras baseadas na utilização de um Hélice e Leme, devido à propulsão vetorizada obtida. Devido à possibilidade de utilizar unidades mais pequenas e de alta velocidade como Motor Propulsor e Bomba Axial, esta Instalação Propulsora apresenta uma densidade de potência superior, relativamente ao volume, às Instalações convencionais, pelo que poderá atingir velocidades mais elevadas do que um Sistema que utilize uma hélice antes de entrar no regime de cavitação. No entanto, este tipo de Instalação tem menor eficiência que a hélice a baixas velocidades, necessita de maior investimento para a sua implementação e existe a possibilidade de a grelha de aspiração ser tapada com detritos. Esta última desvantagem pode ser evitada com a presença de uma equipa de manutenção que intervenha sempre que seja detetado detritos ou objeto preso na grelha de aspiração de água (Altosole, 2012).

Importa referir que para a aplicação deste tipo de Instalação Propulsora, são mais frequentemente utilizados Motores Elétricos para fazer rodar o Impelidor, no entanto, Máquinas de Combustão Interna também se apresentam como Máquinas Principais possíveis de serem aplicadas.

### 3.1.6. Propulsão Combinada

Como mencionado previamente, existe a possibilidade de ser utilizada uma Instalação Propulsora Combinada que reúna vários tipos de Máquinas Principais num navio, de modo a fazer face às exigências de navegação que possam ser encontradas.

Este tipo de Instalação Propulsora é constituído por dois Motores Propulsores num mesmo veio que desenvolvem disjuntivamente ou em simultâneo a potência necessária nos vários regimes de velocidade a serem praticados pelo navio. Existem dois tipos de Instalações Propulsoras Combinadas: Alternada ou Simultânea.

Numa Instalação de Propulsora Combinada Alternada (e.g. *Combined Diesel or Gas, CODOG*), apenas uma das máquinas principais está associada ao eixo propulsor, através da Embraiagem que permite desengatar o veio propulsor do veio motor. Esta seleção do motor propulsor poderá ser efetuada duma maneira manual, através de uma embraiagem de Fricção ou Hidráulica, ou ainda por uma embraiagem dependente da velocidade de rotação dos veios motores, como no caso da Embraiagem *Self Synchronized System (SSS)*.

Numa Instalação Propulsora Combinada Simultânea (e.g. *Combined Diesel and Gas, CODAG*) ambas as máquinas propulsoras poderão estar associadas ao mesmo veio propulsor, sendo necessário, no entanto, que as razões de transmissão dos motores sejam afinadas de modo a não colocar nenhum dos motores a funcionar em esforço continuamente.

Este tipo de Instalação Propulsora, quando aplicado, seguirá o exposto na Figura 16, tendo em conta que o equipamento designado “A” será uma Embraiagem (manual ou automática) no caso da Propulsão ser Alternada ou uma Caixa de Transmissão quando a Propulsão for Simultânea:

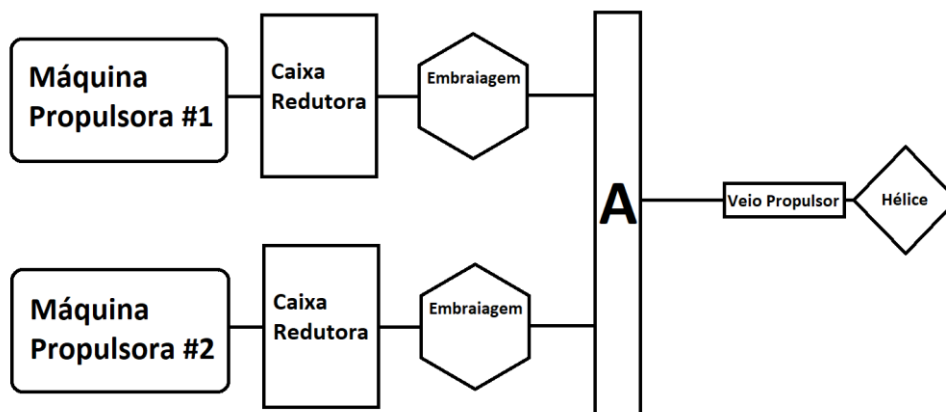


Figura 16 - Diagrama de uma Instalação Propulsora Combinada

### 3.2. Sistemas de Propulsão utilizados em VENT-SUP

Por forma a permitir um ponto de partida para uma análise detalhada dos requisitos funcionais a serem aplicados a este projeto e das possíveis soluções a serem consideradas, será necessário averiguar, também, que sistemas propulsores estão em utilização nos diversos VENT-SUP de modo a considerar e avaliar as diversas opções.

#### 3.2.1. Interceptor

A empresa norte americana *5G Marine* tem vindo a trabalhar em sistemas marítimos autónomos desde 1985, tendo, disponível para aquisição, vários VENT-SUP com capacidades diferentes entre si. O VENT-SUP *Interceptor* (Figura 17) foi um dos produtos da investigação e desenvolvimento de 25 anos da *5G Marine*, apresentado em 2007, com uma autonomia superior a 24 horas e um alcance superior a 1000 milhas.



Figura 17 - Interceptor (EUA)

Este VENT-SUP poderá ser escolhido de entre vários modelos, todos com a utilização de Motores Diesel:

Motor		Potência
Marca	Modelo	(kW)
<i>Cummings</i>	QSD4.2-320HP	240
<i>Steyr Motors</i>	280	205
<i>FPT</i>	N67 560	260

### 3.2.2. *Anaconda 2.0*

Com cerca de 10 metros de comprimento e capacidade de atingir 50 nós, os EUA desenvolveram recentemente o VENT-SUP **Anaconda 2.0** (Figura 18), através da empresa naval *Swiftships*, a ser empregue em Operações de *ISR*, *MCM* e *ASW* em missões de controlo marítimo e combate ao terrorismo, com possibilidade de emprego ribeirinho. Esta embarcação utiliza dois motores Diesel, cada um com capacidade de atingir os 418 kW às 2300 RPM controlados eletronicamente e, como propulsor, dois Sistemas de Hidrojato *Rolls-Royce FF-Series*.



Figura 18 - *Anaconda 2.0* (EUA)

### 3.2.3. *Eclipse*

Desenvolvido pelos Emirados Árabes Unidos (EAU), em parceria com os EUA, este VENT-SUP com 11 metros de comprimento, de nome **Eclipse** (Figura 19), é capaz de atingir a velocidade de 60 nós. Este navio é maioritariamente empregue em Operações

de SAR marítimo e Operações de força e proteção portuária. Este VENT-SUP utiliza um sistema de propulsão híbrido composto por dois Motores Diesel turbo-carregados N67500 de 373 kW para Operações de grandes velocidades e dois motores elétricos de 13 kW para trânsito de baixa velocidade. Em ambas as situações, são utilizados dois Jatos de Água da *Rolls-Royce* do tipo *Kamewa* como propulsor.



Figura 19 - Eclipse (EUA & EAU)

#### 3.2.4. Protector

Outro país dedicado ao desenvolvimento de VENT-SUP é Israel que apresenta, pelo menos, duas unidades de Veículos Autónomos sustentáveis:

O **Protector** (Figura 20), atualmente na sua 5ª Geração (Mod. IV), desenvolvido como meio preventivo a ataques terroristas na área, como o atentado de 2000 ao *USS Cole* da marinha norte americana, apresenta uma velocidade máxima de 50 nós, fazendo uso de um Motor Diesel e um Hidrojato.



Figura 20 - Protector (Israel)

### 3.2.5. *Katana*

O *Katana* (Figura 21), um VENT-SUP destinado ao combate marítimo autónomo e *ISR*, capaz de atingir os 60 nós fazendo uso de dois Motores Diesel com 418 kW cada e de duas hélices como propulsor.



*Figura 21 - Katana (Israel)*

Existem ainda diversos VENT-SUP em utilização por Forças Armadas de outros países. No entanto, estes 5 exemplos são um ponto de partida para o desenvolvimento de uma Instalação Propulsora a aplicar no VENT-SUP-EN da Marinha Portuguesa.



## 4. Aplicação do 1º Axioma da AP ao Projeto VENT-SUP-EN

### 4.1. Definição dos FRs do Projeto

Pretende-se agora aplicar o 1º axioma da AP aos vários sistemas de propulsão descritos no Capítulo 3. Para tal, será necessário primeiro definir os FRs do projeto através dos CNs apresentadas no Capítulo 1 face ao Sistema Propulsor:

1. *Garantir Velocidade Máxima de 40 Nós;*
2. *Permitir uma Autonomia de 4 horas;*
3. *Suportar o Autoadriçamento do VENT-SUP-EN*

Este trabalho aborda o projeto nos níveis mais elevados do projeto conceptual de um sistema propulsor a ser aplicado no VENT-SUP-EN, sendo importante manter o mínimo possível de FRs (**Corolário 2**), pelo que, serão definidos tantos FRs como NCs a colmatar. É nos primeiros níveis de projeto que se pode definir um bom projeto e é nesses níveis que a tomada de boas decisões é mais importante (**Teorema 17**).

#### 4.1.1 Potência

Na fase inicial do Projeto Conceptual foi selecionado o casco do VENT-SUP-EN, de onde resultaram as curvas de resistência e potência que definem a potência propulsora necessária. De modo a *Garantir a Velocidade Máxima de 40 Nós*, será necessário investigar a potência que o Motor do Sistema Propulsor terá de disponibilizar ao propulsor.

Como o casco definido para o VENT-SUP-EN é do tipo *planante*, o cálculo das diversas resistências é um método analítico-empírico proposto por *Daniel Savitsky* em 1964 e um segundo desenvolvimento foi apresentado por *Savitsky* e *Brown* em 1976 num artigo científico intitulado "*Procedure for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water*". O método de *Savitsky* é uma combinação de diferentes teorias com base na Mecânica dos Fluidos e dados empíricos para uma variedade de tipos de casco, para prever a fricção do casco na água.

O Estudo inicial da Resistência e da Potência que o VENT-SUP-EN deveria disponibilizar para ser capaz de atingir uma certa velocidade foi efetuado com o objetivo da velocidade máxima a ser atingida ser na ordem dos 35 nós. No entanto, com a nova

definição do  $NC_1$  em que a velocidade máxima é de 40 nós, será necessário refazer a avaliação da potência necessária, com base na resistência do casco definido.

Para poder calcular os valores de resistência a adotar no casco do VENT-SUP-EN foi utilizado, à semelhança do efetuado na fase inicial do Projeto Conceptual, o software *AutoPower*<sup>®</sup>, que apresenta a capacidade de calcular os valores de resistência e os valores de potência necessários em função da velocidade.

Obteve-se assim o seguinte gráfico que representa os valores de resistência obtidos em função da velocidade do VENT-SUP-EN:

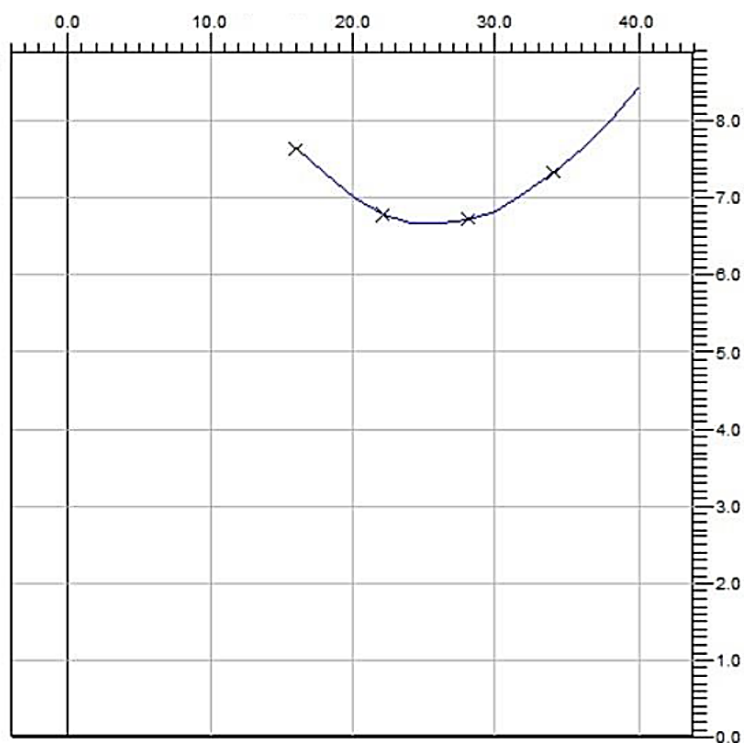


Gráfico 1 - Gráfico de Resistência em função da velocidade do VENT-SUP-EN obtido a partir do *AutoPower*<sup>®</sup>.

O cálculo das resistências é efetuado a partir da velocidade de 16 nós devido ao facto da forma do casco do VENT-SUP-EN não cumprir com determinados parâmetros necessários para que o software efetue os cálculos pelo método de *Savitsky*. Assim sendo, desenvolveu-se uma análise de tendência a partir dos dados obtidos resultando no seguinte:

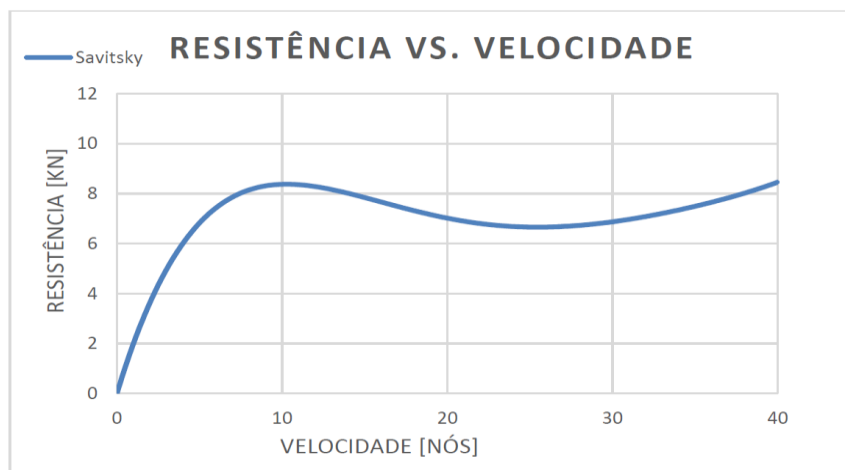


Gráfico 2 - Gráfico de Resistência do VENT-SUP-EN obtido através da linha de tendência do Microsoft™ Excel.

Visto que este gráfico foi desenhado com base na análise de Tendência efetuada pelo Microsoft™ Excel, poderá não ser a forma correta da curva de resistência do VENT-SUP-EN. Comparativamente à curva calculada pelo AutoPower®, não existe grande variação na gama de valores obtidos, sendo a maior diferença de apenas 0,02kN correspondente à velocidade de 30 nós.

Analisando curvas de resistência típicas para cascos planantes, por forma a ter alguma garantia sobre os valores calculados, foram obtidos os seguintes gráficos:

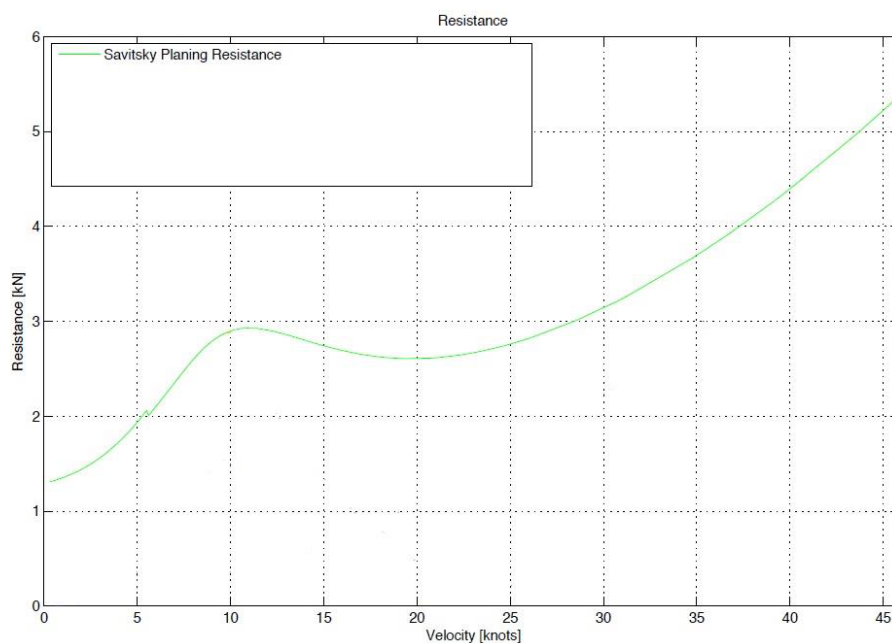


Gráfico 3 - Curva de Resistência com base na Velocidade, típica de uma embarcação com casco planante. Adaptado de: (Bloomberg & Gross, 2014).

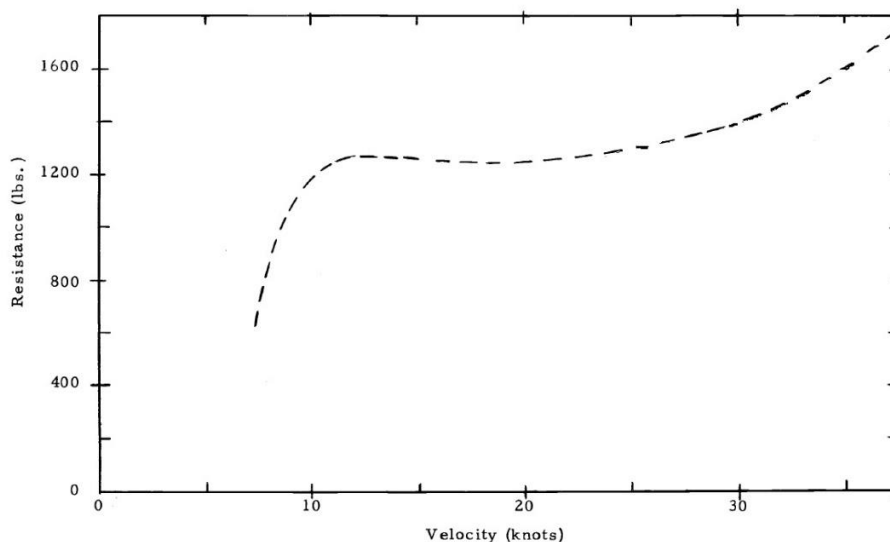


Gráfico 4 - Curva de Resistência com base na Velocidade, típica de uma embarcação com casco planante.  
Adaptado de: (Ladd, 1976).

Onde se verifica que, por norma, os navios com casco planante sofrem uma resistência muito acentuada até atingirem velocidade próximas de 5 nós, pois até então se encontram num regime de deslocamento. Após atingirem estes valores de velocidade, as embarcações entram em regime de semi-deslocamento e somente após o valor de cerca de 10 nós, passam para o regime planante.

Face aos valores de resistência que o VENT-SUP-EN terá de ultrapassar, é necessário definir os valores de potência a fornecer para cumprir as velocidades estipuladas. O *software AutoPower*<sup>®</sup> apresenta, também, a capacidade de calcular os valores de potência a serem fornecidos. Obteve-se, pelo método de *Savitsky*, o seguinte gráfico:

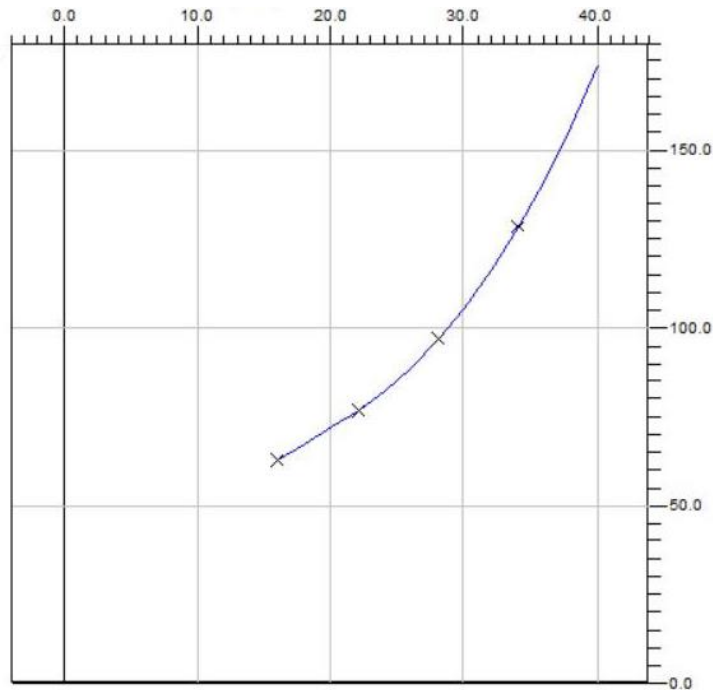


Gráfico 5 - Gráfico de Potência com base na Velocidade do VENT-SUP-EN obtido a partir do AutoPower®.

De maneira semelhante aos cálculos efetuados para a definição da resistência, o software apenas começa a calcular os valores de potência a partir dos 16 nós de velocidade. À velocidade pretendida (40 nós), o valor de potência necessário é de 174 kW. Visto que, tendencialmente, a curva de potência em função da velocidade de uma embarcação é crescente, poderá ser assumido o valor de 174 kW como valor de potência a ser fornecida para obter velocidades até 40 nós.

Uma das práticas correntes adotadas por Engenheiros Navais é evitar a utilização máxima dos níveis de potência obtidos pelas Máquinas Principais de modo a aumentar a fiabilidade e diminuir a probabilidade de necessidade de ações de manutenção corretiva das próprias Máquinas. Assim a maior parte define um nível máximo para ser utilizado em trânsito e em operações não urgentes ou emergentes. Neste projeto irá ser tomado um valor máximo de potência exigível como 80% da potência máxima, sendo que os restantes 20% ainda poderão ser usados no caso de ocorrência de alguma situação de emergência.

Visto que na aquisição de motores propulsores, as diversas marcas fazem uso da potência máxima possível obtida pelo motor, deverá ser escolhida uma máquina com 217,5 kW.

Portanto, o FR<sub>1.1</sub> será: *garantir que o motor atinge valores de potência entre os 215 e os 230 kW ao veio.*

#### **4.1.2 Autonomia**

O FR<sub>1.2</sub> aplicado ao VENT-SUP-EN terá de ser relacionado com a Autonomia da embarcação. Visto que uma das Necessidades da Marinha, apresentadas no Capítulo 1, é que o VENT-SUP-EN seja capaz de *Permitir uma Autonomia de 4 horas*, o FR<sub>1.2</sub> será definido como *Assegurar Autonomia de 4 horas*, o que irá dependendo das Instalações Propulsoras consideradas, necessitar de um ou mais DPs para ser satisfeito. Como o desenvolvimento prévio do casco veio limitar o espaço disponível para embarque de combustível líquido, a quantidade de combustível necessário para assegurar o cumprimento do FR<sub>1.2</sub> terá de ser limitada à carga disponível a ser embarcada. Nas situações que não requirem o embarque de combustível fluido, a fonte de Energia utilizada poderá fazer uso dos espaços destinados ao depósito de combustível desde que tal não viole o constrangimento de massa, a ser abordado de seguida.

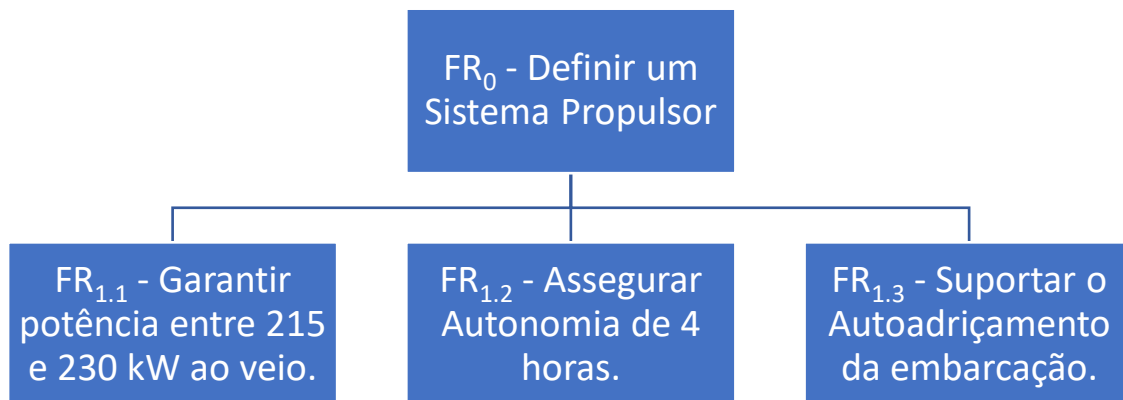
#### **4.1.3 Autoadriçamento**

Devido à capacidade de autoadriçamento presente no casco do VENT-SUP-EN, será necessário ter em atenção o funcionamento do motor do sistema propulsor após uma situação em que a embarcação sofra uma situação autoendireitante. Numa situação em que seja aplicada a capacidade autoendireitante do VENT-SUP-EN, por segurança irá assumir-se que a inclinação da embarcação atingiu os 180º de inclinação (equivalente à posição de inversão total) pois é nesta posição que se poderá dar qualquer um dos casos mais críticos para o motor. Neste caso, será necessário desenvolver um sistema, ativado pela inclinação do VENT-SUP-EN, de modo a atuar em válvulas e/ou outros equipamentos com o propósito de parar a operação do sistema propulsor.

Existe ainda outra situação que requer a atenção, independentemente do Sistema Propulsor escolhido, de quem está a desenvolver a propulsão do VENT-SUP-EN: quando a embarcação atingir valores de inclinação perto dos 180º, é natural que a hélice propulsora saia da água, podendo constituir um perigo para pessoas que estejam na área, e.g. naufragos. Esta situação não ocorre com uma Instalação Propulsora a Jato.

Poderão, ainda, ocorrer outros problemas derivados do autoadriçamento da embarcação, dependendo das Máquinas Principais escolhidas para a Instalação Propulsora. O FR3 será então: *Suportar o Autoadriçamento da embarcação.*

Portanto, a avaliação das Instalações Propulsoras Disponíveis será efetuada face aos seguintes FRs:



## 4.2 Definição dos Constrangimentos do Projeto

Num projeto, os Constrangimentos limitam a definição de FRs e de DPs. Na avaliação de Sistemas Propulsores e subsequentes DPs é necessário entrar com os Constrangimentos de modo a garantir que nenhum das opções abordadas os viola.

Sendo o propósito da criação de um VENT-SUP a ausência de vida humana a bordo, será definido como

- C<sub>1</sub>: *Ausência de tripulação*, que influenciará, no mínimo, as ações de manutenção e de operação dos diversos equipamentos.

Como este projeto já foi iniciado com o desenho do casco e atribuição das tarefas a serem executadas, o decorrer do projeto será baseado nas decisões tomadas até então. A definição do casco do VENT-SUP-EN foi efetuada com a suposição de aplicação de uma Instalação Propulsora de Combustão Interna Alternativa com uma massa total de 800 kg. De modo a evitar uma alteração substancial à estabilidade da embarcação, e tendo em conta as tolerâncias de potência assumidas, que decerto levarão a um aumento de massa do Motor Propulsor, será definido o

- C<sub>2</sub>: *Instalação Propulsora não deverá pesar mais do que 900 kg.*

O acréscimo de 100 kg apresentado no C<sub>2</sub> irá permitir, sem alterar significativamente a estabilidade e a capacidade autoendireitante do VENT-SUP-EN, a aplicação de certos sistemas de alimentação das Máquinas Principais, para alguns tipos de Instalação Propulsora bem como a alteração do Motor Propulsor, devido às tolerâncias de Potência apresentadas.

O desenvolvimento do VENT-SUP-EN tem como missão principal o auxílio da Marinha Portuguesa no exercício das suas funções, pelo que não será aconselhável que esta embarcação apresente necessidades acrescidas de desenvolvimento, formação de pessoal e operação de sistemas de propulsão pelo que, segundo o EMA em publicação Reservada, será definido o

- C<sub>3</sub>: *Deverão ser consideradas soluções semelhantes às atualmente existentes e em operação na Marinha Portuguesa.*

### **4.3 Avaliação das Máquinas Principais**

De modo a se proceder à avaliação das Instalações Propulsoras disponíveis a serem aplicados ao VENT-SUP-EN será necessário primeiro definir quais serão as Máquinas Principais possíveis de serem aplicadas. A avaliação com base na AP será efetuada a todas os tipos de Máquinas Principais apresentadas menos às Instalações Propulsoras Nuclear, a Vapor e a Jato visto que nenhuma dessas Instalações se encontra em operação pela Marinha Portuguesa, o que violaria o C<sub>3</sub>.

De seguida apresenta-se a definição dos possíveis DPs, por aplicação de Máquinas Principais ao Sistema Propulsor, a satisfazer os FRs definidos anteriormente:

#### **4.3.1 Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa**

No âmbito das Máquinas de Combustão Interna Alternativas, como definido previamente, o motor selecionado será da tecnologia Diesel a 4 Tempos, devido às limitações apresentadas relativamente às outras Máquinas de Combustão Interna Alternativas, e, de modo a satisfazer o FR<sub>1.1</sub>: *Garantir Potência entre 215 e 230 kW*, será considerado o DP<sub>1.1</sub>: *Motor Diesel com potência disponível superior a 230 kW*.

De modo a cumprir o FR<sub>1.2</sub>: *Assegurar Autonomia de 4 horas*, sendo o combustível utilizado pelo motor o Diesel, terá de ser assegurado uma quantidade de

combustível disponível para utilização do motor que permita uma autonomia de 4 horas. Existem diversas maneiras possíveis de assegurar o funcionamento da embarcação durante 4 horas sem voltar ao navio hospedeiro, de entre as quais:

- i. Depósito de Combustível suficientemente grande para assegurar que existe combustível necessário para o funcionamento da embarcação durante 4 horas;
- ii. Embarque consequente de combustível ao longo de 4 horas assegurado por um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) ou por outro VENT-SUP;

Por ser o método mais eficiente e mais utilizado em todas as Marinhas e em embarcações particulares, além de ser o método mais simples atualmente em utilização, será implementado um Depósito de Combustível que seja capaz de armazenar o combustível necessário ao funcionamento do VENT-SUP-EN durante quatro horas.

Um Motor Diesel apresenta, tipicamente, valores de Rendimento Térmico ( $\eta$ ) entre os 30% e os 40%. Para se proceder ao cálculo da quantidade de combustível necessário de modo a assegurar o funcionamento do Motor Diesel durante 4 horas, será necessário ter em conta que o Poder Calorífico Inferior (PCI) do Diesel é de 43,0 MJ/kg, a densidade ( $\rho$ ) do Diesel é de cerca de 0,837 kg/L, a potência necessária a ser obtida ( $P$ ) será 230 kW e a Autonomia ( $A$ ), em segundos, é de 14 400 s. Com estes dados, poderá então ser efetuado o seguinte cálculo:

<b>Rendimento:</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>
<b>Fuel<sub>Necessario</sub>:</b>	307 L	230 L

Sendo que:

$$Fuel_{Necessario} = \frac{P * A}{PCI * \eta * \rho} \quad (14)$$

Pelo que, para o cumprimento do FR<sub>1.2</sub>, o DP<sub>1.2</sub> será: *Depósito de Combustível de 270L, com uma tolerância de 40L.*

Por fim, para assegurar o cumprimento do FR<sub>1.3</sub>: *Suportar o Autoadriçamento*, será necessário definir um sistema de segurança que permita atingir valores de inclinação de embarcação invertida sem comprometer o funcionamento do Motor

Diesel. Nos Motores a Diesel, a inversão do sistema poderá trazer problemas ao nível da lubrificação. Outro problema associado às Máquinas de Combustão Interna Alternativas, é a conduta de admissão de ar ao motor que, se a embarcação atingir um elevado valor de inclinação, irá fazer embarque de água para o motor. De maneira semelhante, o possível embarque de água através da conduta de evacuação poderá ocorrer, levando, também, à possibilidade de entrada de água no motor. Estes problemas derivados da inclinação do VENT-SUP-EN poderão ser resolvidos se for instalado um sistema de segurança ativado pela inclinação através de um inclinómetro que, quando ativado, para o motor e fecha a válvula de admissão de ar, a de evacuação dos gases resultantes da combustão e a de sucção da bomba de aspiração do óleo no cárter, evitando a entrada de água na conduta de admissão de ar e na conduta de evacuação e mantendo o engodo na bomba de óleo. Quando, após o autoadriçamento ou a estabilização da embarcação, for detetado pelo sensor uma posição estável, este irá ligar de novo o motor e abrir todas as válvulas que tinham sido fechadas, para prosseguir com a missão. Deste modo, o DP<sub>1.3</sub> será: *Sistema de Segurança para Motor Diesel*.

Para aplicação do 1º Axioma da Teoria Axiomática de Projeto é necessário a definição da Matriz de Projeto com base nos FRs e DPs escolhidos. A potência obtida a partir do motor é apenas dependente da MCI escolhida como motor propulsor. No entanto, a autonomia do motor obtida é dependente dos níveis de potência a serem empregues (FR<sub>1.1</sub>) que irão afetar o consumo de combustível. O Funcionamento do Motor Propulsor após ser atingida uma posição de inversão, não dependerá nem da potência do motor nem da quantidade de combustível disponibilizado, pelo que a Matriz de Projeto quando for selecionado uma Instalação Propulsora de Combustão Interna Alternativa será:

$$\begin{Bmatrix} FR1.1 \\ FR1.2 \\ FR1.3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1.1 \\ DP1.2 \\ DP1.3 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Portanto, para o VENT-SUP-EN, a escolha de uma Instalação Propulsora de Combustão Interna Alternativa traduz-se num projeto **Desacoplável**.

#### 4.3.2 Máquina Principal de Combustão Interna Rotativa

Analisando, agora, a possibilidade de ser aplicada uma Máquina Principal de Combustão Interna Rotativa para o VENT-SUP-EN, foi selecionado para o DP<sub>1.1</sub>: *Turbina a Gás com Potência Disponível superior a 230 kW*.

De maneira semelhante à aplicação de uma Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa, a autonomia disponível da embarcação irá depender da potência a ser atingida pelo motor propulsor (FR<sub>1.1</sub>). Selecionando, novamente, o depósito de combustível no VENT-SUP-EN como a opção a adotar, será necessário verificar a quantidade de combustível necessário para uma Turbina, que apresenta valores de Rendimento Térmico ( $\eta$ ) entre os 15% e os 25%. Seguindo os cálculos efetuados para o cálculo da quantidade de combustível necessária para aplicação de uma Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa e utilizando os valores de **PCI**,  **$\rho$** , **P** e **A** previamente definidos obteve-se:

<b>Rendimento:</b>	<b>15%</b>	<b>25%</b>
<b>Fuel<sub>Necessario</sub>:</b>	614 L	368 L

Portanto, o DP<sub>1.2</sub> a ser aplicado numa Instalação Propulsora de Combustão Interna Rotativa será: *Depósito de Combustível de 491L, com uma tolerância de 123L*.

Apesar de não existir nenhum cárter na Turbina, o sistema de lubrificação será assegurado por um depósito de óleo que, de maneira semelhante ao cárter de um Motor a Diesel, dependendo do grau de inclinação atingido, poderá vir a desengodar a bomba de aspiração de óleo. Além desta diferença o problema associado à condução de admissão de ar e da saída da hélice da água face uma certa inclinação continua presente na Turbina a Gás, pelo que será necessário definir um sistema de segurança, semelhante ao do Motor Diesel. Nessa situação, o sistema responderá parando a Turbina, fechando a válvula de admissão de ar, a válvula de evacuação dos gases produto da combustão e a válvula de aspiração de óleo presente no depósito do sistema de lubrificação.

Tornando assim o DP<sub>1.3</sub>: *Sistema de Segurança para Turbina a Gás*.

A Equação deste projeto, de maneira semelhante ao definido previamente no projeto de Motor Diesel, será então:

$$\begin{cases} FR1.1 \\ FR1.2 \\ FR1.3 \end{cases} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{cases} DP1.1 \\ DP1.2 \\ DP1.3 \end{cases} \quad (16)$$

Sendo, portanto, o projeto da definição de uma Turbina a Gás como motor propulsor do VENT-SUP-EN também um projeto **Desacoplável**.

#### 4.3.3 Máquina Principal Elétrica

No caso da aplicação de um DP<sub>1.1</sub>: *Motor Elétrico com Potência Disponível superior a 230 kW*, existem diversas alterações face aos sistemas previamente mencionados.

Para um Motor Elétrico que faça uso exclusivo de baterias, a sua autonomia estará diretamente relacionada com a capacidade das baterias a bordo para o efeito. De modo a calcular a capacidade total das baterias necessária para o cumprimento do FR<sub>1.2</sub> terá de ser assumido que um Motor Elétrico apresenta, usualmente, um Rendimento Mecânico de 90% a 95%. O cálculo necessário para a determinação da capacidade total mínima do banco de baterias presente no VENT-SUP-EN para alimentação da Instalação Propulsora irá depender da Tensão do circuito (V) e do tipo de Motor Elétrico utilizado. O Motor Elétrico poderá ser de Corrente Alternada (*Alternate Current, AC*) ou de Corrente Contínua (*Direct Current, DC*). Para efeitos de cálculo, será considerada a utilização de um Motor Elétrico DC. O cálculo da capacidade fornecida pelas baterias será obtido pelo produto da Intensidade de Corrente (I) pela Autonomia (H), em horas. Visto que o cálculo da Potência obtida num Circuito Elétrico será  $P = V * I$ , a Intensidade da Corrente será  $I = \frac{P}{V}$  onde, aplicando o Rendimento Mecânico do Motor Elétrico, se fica com  $I = \frac{P}{V * \eta}$ . Então é possível obter:

<b>Rendimento</b>	<b>90%</b>	<b>95%</b>
<b>Capacidade</b>	2 323 Ah	2 201 Ah

Portanto, o DP<sub>1.2</sub> para a Instalação Propulsora Elétrica com uso de Baterias será: *Banco de Baterias com 2 262 Ah*, onde será aplicada uma tolerância de 61 Ah. Para efeitos de

cálculo da quantidade de baterias a ser utilizada, serão considerados Bancos de Baterias de Iões de Lítio de capacidade reduzida ( $\rho=180$  Wh/kg) e de capacidade elevada ( $\rho=300$  Wh/kg), semelhantes àqueles em utilização na indústria automóvel.

As possibilidades que envolvam produção de Energia Elétrica a bordo serão abordadas mais à frente. Com a seleção de Baterias, o VENT-SUP-EN poderá ser empregue dos navios após um carregamento total do banco de baterias a bordo.

De maneira semelhante aos outros sistemas propulsores abordados previamente, será necessário definir um Sistema de Segurança, apenas para o funcionamento do Hélice do VENT-SUP-EN da água quando for atingida uma certa inclinação. Assim, é definido o DP<sub>1.3</sub>: *Sistema de Segurança de Motor Elétrico* que, de maneira mais simples do que os outros Sistemas Propulsores abordados, deverá, com base em valores de inclinação, fornecidos por um sensor de inclinação, mandar desligar e frear o motor elétrico.

De modo a serem instaladas baterias que apresentem uma capacidade que permita a satisfação do FR<sub>1.2</sub>, será utilizado espaço que, para outro tipo de Instalação Propulsora, poderia ser utilizado para aplicação de um depósito de combustível.

Na definição das relações entre FRs, é possível verificar que, a potência requerida (FR<sub>1.1</sub>), apenas dependerá do Motor Propulsor (DP<sub>1.1</sub>). De maneira semelhante ao definido nos projetos de Instalações Propulsoras de Combustão Interna, a Autonomia do VENT-SUP-EN utilizando Motores Elétricos irá depender do DP<sub>1.2</sub>, visto que as Baterias têm limite de capacidade de Energia Elétrica e não existe nenhum sistema de produção de Energia Elétrica a bordo para ir carregando as Baterias; e dos níveis de potência a serem atingidos (FR<sub>1.1</sub>) pois o consumo de Energia Elétrica está diretamente relacionado com os regimes de máquinas praticados pelo Sistema Propulsor. De maneira semelhante aos outros casos abordados até agora, a definição do Sistema de Segurança não terá impacto direto na potência necessária, nem na autonomia disponível do Sistema Propulsor.

Deste modo, a Equação de Projeto seguinte é referente à utilização de um Motor Propulsor Elétrico fazendo uso exclusivo de Baterias:

$$\begin{cases} FR1.1 \\ FR1.2 \\ FR1.3 \end{cases} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{cases} DP1.1 \\ DP1.2 \\ DP1.3 \end{cases} \quad (17)$$

Sendo, portanto, a definição de um Motor Elétrico como motor propulsor do VENT-SUP-EN, fazendo uso de baterias e sendo aplicado um Sistema de Segurança, um projeto **Desacoplável**, à Luz da Teoria Axiomática de Projeto.

#### 4.3.4 Máquina Principal Diesel-Elétrica

Com a definição do DP<sub>0</sub>: “*Instalação Propulsora Diesel-Elétrica*”, existe a necessidade de definir o DP<sub>1.1</sub>: “*Motor Elétrico com Potência Disponível superior a 230 kW*”, visto que as limitações associadas no âmbito da propulsão serão as mesmas que no caso da definição de uma *Instalação Propulsora Elétrica com uso de Baterias*, acrescidas de eventuais limitações a serem aplicadas ao Motor Gerador na produção de Energia Elétrica. Assegurada a potência necessária pelo Motor Propulsor (Elétrico) será, agora, necessário garantir que os níveis de autonomia e de segurança face ao autoadriçamento do VENT-SUP-EN sejam atingidos.

O cumprimento do FR<sub>1.2</sub> poderá ser assegurado pela geração de Energia Elétrica efetuada pelo Motor Gerador ou pelo banco de baterias disponível. De modo a prolongar a autonomia disponível do VENT-SUP-EN. A alimentação do Motor Propulsor será primeiro diretamente assegurada pelo Motor Gerador, e só no caso de haver um problema no sistema de produção de Energia Elétrica (e.g. falta de combustível) é que a alimentação do Motor Propulsor passará, automaticamente, para o banco de Baterias. A autonomia da embarcação irá, então, depender da produção de Energia Elétrica que irá, por sua vez, depender da quantidade de combustível a bordo. Poderão ser, então, definidos o DP<sub>1.2</sub>: *Moto Gerador com Depósito de Combustível* e o DP<sub>1.3</sub>: *Baterias*. O regime de máquinas ideal ocorre a certa velocidade de rotação do Motor Diesel que permita a produção de Energia Elétrica suficiente para alimentar o Motor Propulsor e os sistemas auxiliares de bordo que estejam a ser utilizados. A aplicação de ambos estes equipamentos (Moto Gerador e Baterias) como fontes de alimentação do Motor Propulsor, é um projeto de redundância alternativa, ou seja, como referido no Capítulo 2, uma redundância em que ambos os DPs satisfazem o FR<sub>1.2</sub> não simultaneamente.

O DP<sub>1.4</sub> será: *Sistema de Segurança no Motor Diesel e no Motor Elétrico* que irá funcionar com base no fecho das válvulas de admissão de ar, de evacuação dos produtos da combustão e de circulação do óleo no Motor Diesel e paragem de ambos os motores quando for detetada uma inclinação crítica e, após deteção de posição estável, ligar ambos os motores e abrir as válvulas previamente fechadas.

A Potência do Motor Elétrico continuará a ser apenas dependente desse mesmo motor, enquanto que a sua Autonomia será dependente do sistema de produção de Energia Elétrica e das baterias utilizadas, assim como do consumo de Energia Elétrica no Motor Propulsor. De maneira semelhante, o Sistema de Segurança apresentado irá atuar independentemente dos níveis de potência a serem atingidos (FR<sub>1.1</sub>) ou da Autonomia disponível (FR<sub>1.2</sub>), pelo que se consegue obter a seguinte Equação de Projeto:

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1} \\ FR_{1.2} \\ FR_{1.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1} \\ DP_{1.2} \\ DP_{1.3} \\ DP_{1.4} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Portanto, o projeto de uma Instalação Propulsora Diesel-Elétrico com Baterias será também **Desacoplável Redundante**.

#### 4.3.5 Máquina Principal Turbo-Elétrica

Ao nível de avaliação efetuado nesta dissertação, a aplicação de uma Instalação Propulsora Turbo-Elétrica com Baterias é muito semelhante à Instalação Propulsora Diesel-Elétrica com Baterias, pois a única alteração é no Motor Gerador que, em vez de ser um Motor Diesel, será uma Máquina de Combustão Interna Rotativa (Turbina a Gás). Para o mesmo espaço disponível tem uma maior capacidade de produção de Energia Elétrica, associado a maior consumo de combustível.

De modo a cumprir o FR<sub>1.1</sub> será então definido o DP<sub>1.1</sub>: *Motor Elétrico com Potência Disponível superior a 230 kW*. De modo a cumprir o FR<sub>1.2</sub>, de modo semelhante ao efetuado para a Instalação Propulsora Diesel-Elétrica com Baterias, o DP<sub>1.2</sub> será definido como *Turbogerador com Depósito de Combustível* e o DP<sub>1.3</sub>: *Baterias*, sendo que, com a aplicação de uma Turbina a Gás como Motor Gerador, será mais improvável obter valores reduzidos de consumo de combustível a um regime de máquinas que seja capaz de alimentar todos os circuitos elétricos de bordo. No entanto, esta Instalação

Propulsora não é, de todo, inválida, devido à aplicação de Baterias que poderão alimentar os circuitos elétricos de bordo, após a utilização de todo o combustível de bordo, o que constitui, no âmbito da Teoria Axiomática de Projeto, uma redundância semelhante à aplicada na Instalação Propulsora anterior.

Para o cumprimento do  $FR_{1.3}$ , será definido o  $DP_{1.4}$ : *Sistema de Segurança na Turbina e Motor Elétrico* que consistirá, não só no sistema de paragem de ambos os motores, como também no fecho das válvulas de admissão de ar, de evacuação dos produtos da combustão na Turbina e de circulação do sistema de lubrificação que se encontre imediatamente antes da Bomba de circulação, para impedir o desengodo da mesma.

A potência obtida na propulsão será dependente apenas do Motor Elétrico utilizado, enquanto que, para assegurar a Autonomia de 4 horas, será necessário a definição de Baterias com capacidade suficiente, de uma Turbina Geradora capaz de produzir Energia Elétrica suficiente para o Motor Propulsor funcionar durante quatro horas e de um Motor Propulsor Elétrico que apresente um consumo de Energia Elétrica inferior à capacidade de produção do Motor Gerador. De maneira semelhante às Instalações Propulsoras até agora avaliadas, o cumprimento do  $FR_{1.3}$  irá depender apenas do Sistema de Segurança aplicado. A Equação de Projeto obtida decorrente da avaliação da Teoria Axiomática será então a seguinte:

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1} \\ FR_{1.2} \\ FR_{1.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1} \\ DP_{1.2} \\ DP_{1.3} \\ DP_{1.4} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

O que resulta num projeto **Desacoplável** com possibilidade de Redundância, tal como o sucedido numa Instalação Propulsora de um Sistema Diesel-Elétrico.

#### 4.3.6 Máquina Principal Elétrica com uso de *Fuel Cells*

Com a utilização de uma Instalação Propulsora que faça uso da *tecnologia Fuel Cell* e de Baterias, deixa de ser necessário a presença de Diesel a bordo. No entanto, terá de ser embarcado Hidrogénio que servirá como combustível para a produção de Energia Elétrica na *Fuel Cell*.

Como em todas as Instalações Propulsoras Elétricas, o  $DP_{1.1}$  será: *Motor Elétrico com Potência Disponível superior a 230 kW*.

De modo a cumprir o  $FR_{1.2}$ , o DP relacionado com a instalação de Fuel Cells dependerá da quantidade de Hidrogénio armazenada a bordo. Independentemente do depósito utilizado, o  $DP_{1.2}$ , para cumprir o  $FR_{1.2}$ , será *Depósito de Hidrogénio*, e o  $DP_{1.3}$ : *Baterias*.

O  $DP_{1.4}$ : *Sistema de Segurança no Motor Elétrico e Fuel Cells*, irá permitir o autoadriçamento do VENT-SUP-EN sem pôr em causa o funcionamento do sistema de *Fuel Cells*, que requer a admissão de ar atmosférico, ou a segurança de pessoas que se encontrem na água junto à embarcação.

Deste modo, a equação de projeto será a seguinte, que resulta, como em todas as outras Máquinas Principais até agora avaliadas, num projeto **Desacoplável** com capacidade de redundância à alimentação do Motor Elétrico:

$$\begin{Bmatrix} FR_{1.1} \\ FR_{1.2} \\ FR_{1.3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1.1} \\ DP_{1.2} \\ DP_{1.3} \\ DP_{1.4} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

Visto que todas as Instalações Propulsoras resultaram em Projetos Desacopláveis, a teoria Axiomática de Projeto indica que é necessário utilizar o Axioma da Informação para escolher a solução a prosseguir.



## **5 Aplicação do 2º Axioma da AP ao projeto VENT-SUP-EN**

Visto que o cálculo de Informação só poderá ser definido no contexto do Domínio Funcional, será necessário definir os constrangimentos que ponham em causa a aplicação dos DPs selecionados.

### **5.1 FR<sub>1.1</sub>**

Analisando o FR<sub>1.1</sub>, o seu cumprimento irá depender da potência máxima disponibilizada pelo Motor Propulsor e da capacidade de controlo da potência a ser obtida num determinado instante.

Devido ao facto de apenas estarem a ser considerados 3 tipos de Máquinas Principais Propulsoras diferentes, irá agora ser avaliada a capacidade da potência máxima se encontrar nos valores pretendidos e da capacidade de controlo da potência a ser obtida pelo Motor Propulsor ser exequível. O Controlo de Potência vem garantir o comando e controlo efetivo do VENT-SUP-EN visto que este poderá ser empregue em situações de tráfego intenso, onde seja necessário adaptar a velocidade a praticar, como por exemplo junto a portos, e em casos de Homem ao Mar, onde deverá ser feita uma abordagem cuidada que permita a aproximação das pessoas na área sem colocar ninguém em risco.

No caso da aplicação de um Motor Diesel como Motor Propulsor, pode-se verificar que existem Motores Diesel com potência máxima disponível dentro dos valores pretendidos, bem como, o seu controlo está praticamente presente em todas as suas aplicações. No ramo automóvel, por exemplo, existem diversos Motores Diesel em funcionamento com capacidade de obtenção de potência superior a 230 kW sempre associados a controladores de potência que controlam a quantidade de combustível que é inserido na câmara de combustão. Portanto, visto que a possibilidade da obtenção de um Motor a Diesel com capacidade de controlo de potência disponibilizada com valores máximos a rondar os 230 kW ou mais é praticamente 100%, o conteúdo de Informação presente neste FR para a aplicação de um Motor Diesel é, praticamente, nulo.

Avaliando agora a aplicação de uma Turbina a Gás como Motor Propulsor, a obtenção da potência necessária para o sistema propulsor será, praticamente, sempre atingida visto que uma turbina a gás obtém, tipicamente, valores mais elevados de potência do que uma Máquina de Combustão Interna Alternativa do mesmo tamanho. Portanto, se à partida a potência obtida com a Turbina a ser completamente alimentada é superior à potência necessária para o cumprimento do FR, só será necessário aplicar um doseador de combustível à câmara de combustão como controlador de carga. Tendo em conta que este sistema de controlo de carga já existe em utilização, tanto no sector civil como no sector naval militar, o cumprimento do FR<sub>1.1</sub> com base na aplicação de uma Turbina a Gás como motor propulsor será, praticamente, assegurado, levando a que a Informação presente neste FR seja, de maneira semelhante ao Motor Diesel, nula.

Finalmente, com a implementação de um Motor Elétrico como motor propulsor, visto que o controlo da potência obtida é feito através da regulação da corrente a passar no motor, só terá de ser garantida a escolha de um Motor Elétrico que tenha capacidade de atingir, pelo menos, os 230 kW. Como existem Motores Elétricos com capacidades de atingir potência obtida na ordem dos *Mega Watts*, a obtenção de valores de potência na ordem dos 230 kW é empírica que seja garantida. Analogamente, este FR não apresentará nenhuma Informação relativamente à aplicação de um Motor Elétrico como Motor Propulsor.

Portanto, nenhum dos Sistemas Propulsores em avaliação irá apresentar qualquer conteúdo de Informação relativamente à satisfação do FR<sub>1.1</sub>.

## 5.2 FR<sub>1.2</sub>

De modo a avaliar a Informação presente no cumprimento do FR<sub>1.2</sub> (*Assegurar Autonomia de 4 horas*) será necessário definir a função densidade probabilidade de o requisito ser cumprido, não violando o Constrangimento aplicado ao projeto VENT-SUP-EN, mais especificamente, o constrangimento de massa ( $C_2$ ). O cumprimento deste Requisito é condicional, pelo que se assume que o FR<sub>1.1</sub> está a ser cumprido. Deste modo, a probabilidade de pertença do FR<sub>1.2</sub> neste projeto será assumida como  $P(\text{FR}_{1.2} | \text{FR}_{1.1})$ .

A função densidade probabilidade do FR<sub>1.2</sub> (*Design Range*) poderá, então, ser definida:

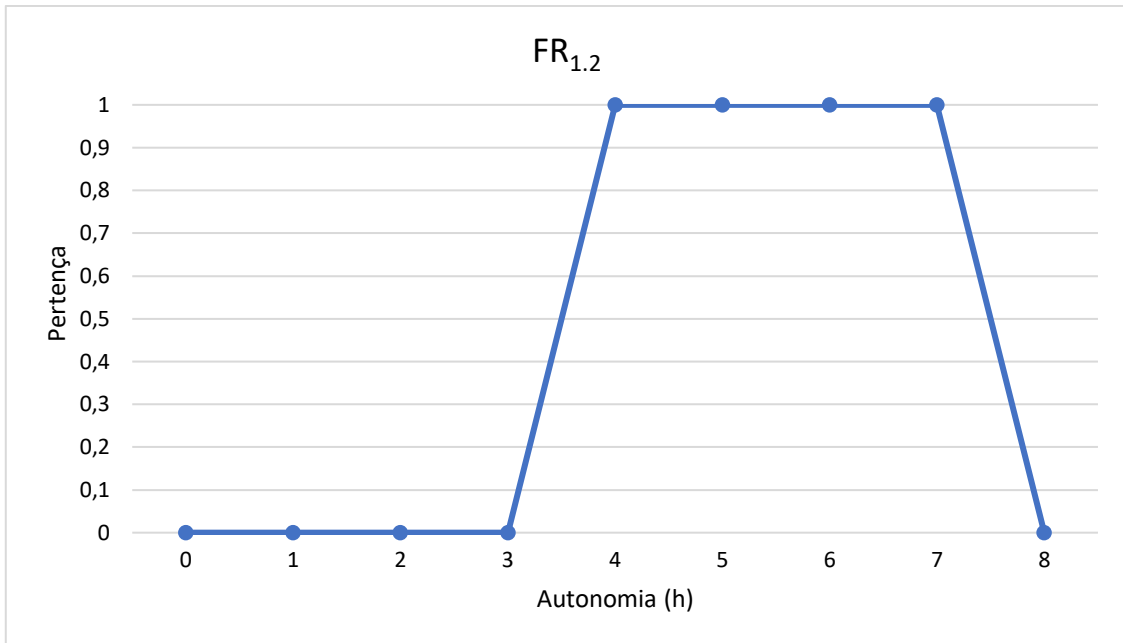


Gráfico 6 - Design Range do FR1.2

Pelo que, será necessário agora, verificar se os DPs escolhidos têm capacidade de obter Autonomias, idealmente, entre os valores de 4 e 7 horas. Para o cumprimento do FR<sub>1.2</sub> poderá ser necessário um depósito de combustível, baterias ou um sistema gerador de energia elétrica com baterias associadas. Tendo em conta que, previamente, foram projetados dois depósitos de combustível a ré do VENT-SUP-EN (Figura 2), cada um com cerca de 200 litros de capacidade (Figura 3), irá ser este o espaço de armazenamento de combustível a ser considerado inicialmente por depósito. No entanto, se com este espaço total de 400 litros, a Máquina Principal avaliada não tiver valores de Autonomia dentro do definido no *Design Range* e não apresentar um conteúdo de Informação nulo, poderá ser considerado um espaço de combustível disponível até serem atingidos os 900 kg limitados pelo C<sub>2</sub>.

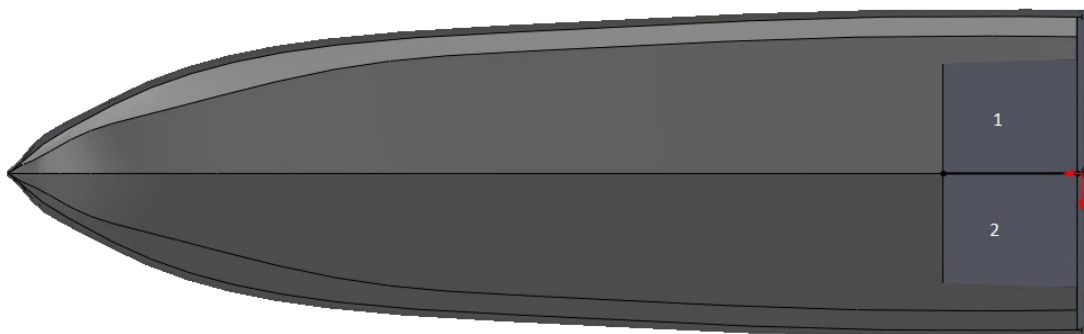


Figura 22 - Localização dos Tanques de Combustível

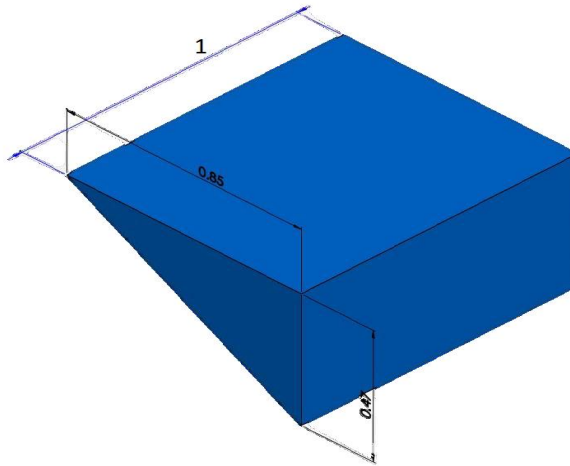


Figura 23 - Dimensões de um dos Tanque de Combustível projetados para o VENT-SUP-EN

### 5.2.1 Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa

Com a seleção de uma Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa e com a utilização de dois depósitos com 200 litros de combustível cada a serem utilizados pelo Motor Diesel, poderá ser determinada a *Common Area*, utilizada no cálculo do Conteúdo de Informação. A Autonomia obtida pela utilização de um Motor de Combustão Interna Alternativo poderá ser obtida pela Equação 21:

$$A = \frac{\text{Depósito} * PCI * \eta * \rho}{P} \quad (21)$$

Portanto,

Rendimento	Autonomia (s)	Autonomia (h e m)
30%	18 778	5h 13m
35%	21 908	6h 5m
40%	25 037	6h 57m

Entrando agora com estes valores de Autonomia a serem atingidos pelo Motor Diesel, obtém-se a seguinte *Common Area*:

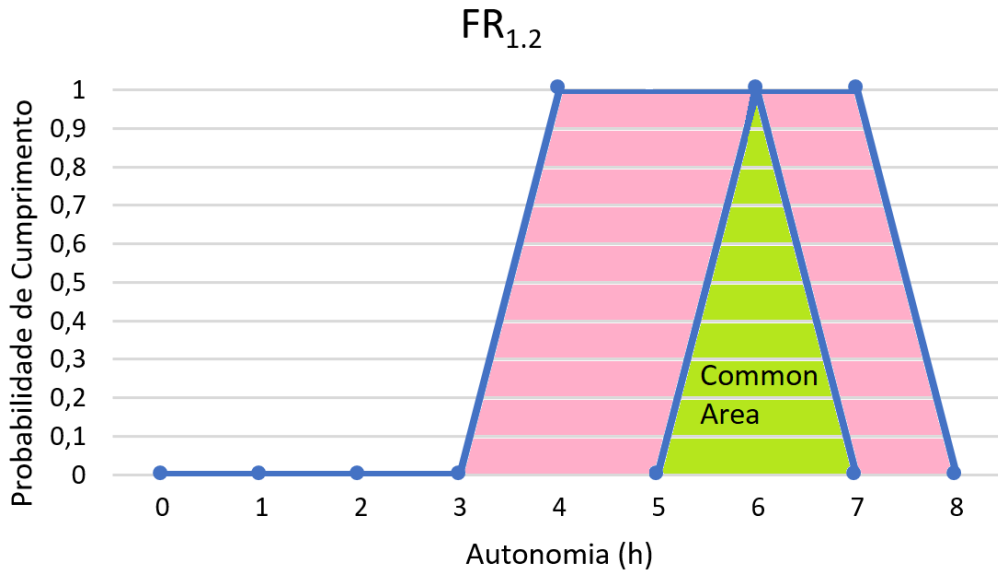


Gráfico 7 - Common Area do  $FR_{1,2}$  com a utilização de Motor Diesel

O Conteúdo de Informação deste FR pode ser obtido com a utilização da Equação 7, onde, como a *System Area* se encontra totalmente dentro do *Design Range*, a informação necessária para o cumprimento do  $FR_{1,2}$ , neste caso, será igual a **zero**:

$$I = \log_2 \frac{0.8693}{0.8693} = 0 \quad (22)$$

### 5.2.2 Máquina Principal de Combustão Interna Rotativa

Irá ser calculado o conteúdo de Informação presente num projeto em que seja definida, como Máquina Principal, uma Turbina a Gás, de modo a garantir a seleção do melhor sistema propulsor com base na Teoria Axiomática de Projeto.

De maneira semelhante utilizada para o cálculo da Autonomia a ser atingida por uma Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa, poderá ser obtida, utilizando a Equação 15, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** a Autonomia para uma Máquina Principal de Combustão Interna Rotativa sujeita aos mesmos níveis de potência, com rendimentos a rondar os 20%.

Rendimento	Autonomia (s)	Autonomia (h e m)
15%	9 389	2h 36m
20%	12 519	3h 29m
25%	15 648	4h 21m

A *Common Area* referente à aplicação de uma Turbina a Gás como Motor Propulsor no cumprimento do FR<sub>1.2</sub> será:

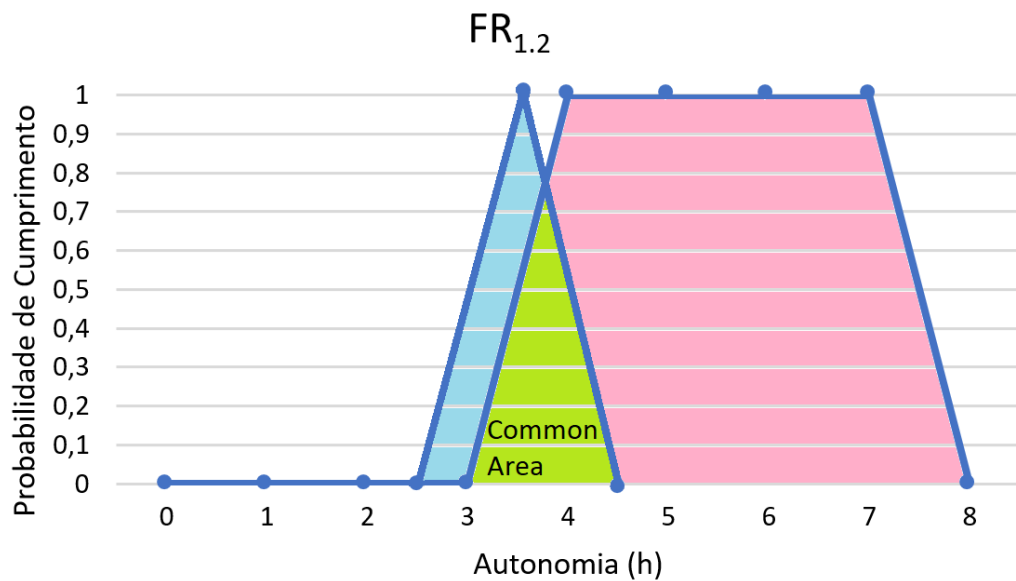


Gráfico 8 - Common Area do FR<sub>1.2</sub> com a utilização de Turbina a Gás e depósito de 400L

Como definido previamente, visto o *System Area* não se encontrar inteiramente dentro do *Design Range*, o depósito de combustível será adaptado. De modo ao limite máximo (referente à utilização de uma Turbina a Gás com Rendimento de 25%) atingir uma Autonomia máxima aceitável neste projeto, o Depósito de Combustível selecionado terá de ter uma capacidade de 736 L. Este valor poderá ser arredondado para 700 L, tendo, então, uma massa de 586 kg que, somada à massa típica de uma Turbina a Gás para esta Potência (150 kg) não ultrapassa o definido no C<sub>2</sub>.

Com 700 L de combustível disponíveis, a Turbina a Gás apresentará a seguinte Autonomia:

Rendimento	Autonomia (s)	Autonomia (h e m)
15%	16 431	4h 34m
20%	21 908	6h 05m
25%	27 384	7h 36m

Obtendo, assim, a seguinte *Common Area*:

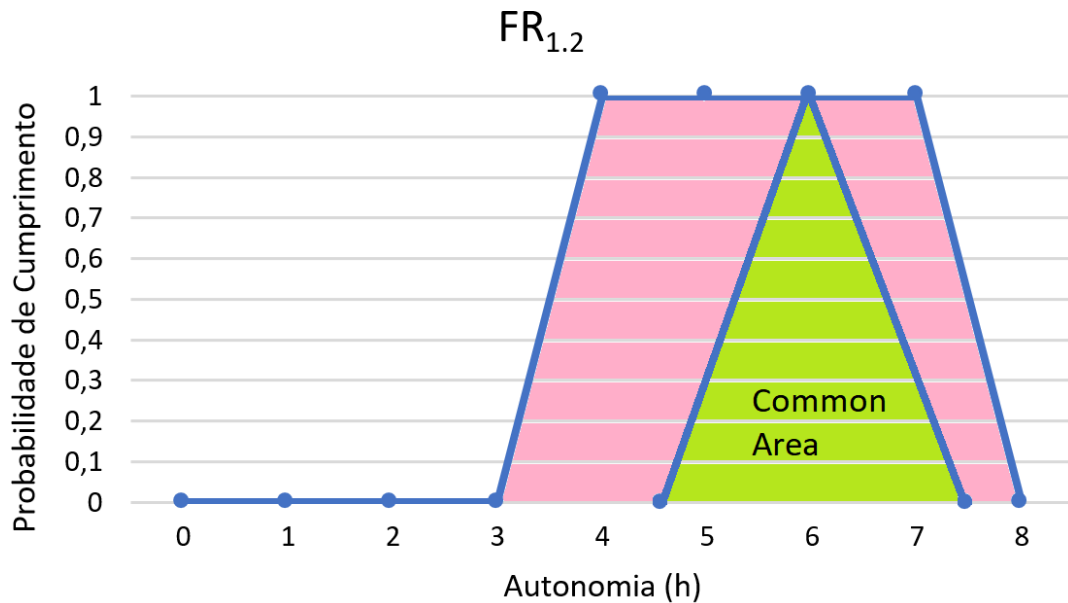


Gráfico 9 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Turbina a Gás e depósito de 700 L

Onde a Informação presente será nula, visto que a *Common Area* se encontra totalmente dentro da *System Area*.

$$I = \log_2\left(\frac{\frac{26 + 120 + 34}{2}}{\frac{26 + 120 + 34}{2}}\right) = 0 \quad (23)$$

### 5.2.3 Máquina Principal Elétrica

Com a aplicação de um Motor Elétrico como Motor Propulsor, a Autonomia dependerá das Baterias. A seleção da tecnologia de Baterias a ser utilizada irá, diretamente, influenciar a capacidade de a Instalação Propulsora atingir valores de Autonomia.

De modo a não ultrapassar os 900 kg definidos pelo C<sub>2</sub> como limite para o Sistema Propulsor, irá ser limitada a quantidade de baterias a ser instalada a bordo, pelo que, assumindo que o Motor Elétrico e os restantes equipamentos necessários para o funcionamento e controlo do motor pesam, no total, 150 kg, irá ser estabelecido o limite do banco de baterias de 750 kg. A capacidade total de Energia Elétrica será entre os 210 kWh, obtido com a utilização de baterias de elevada capacidade, e 126 kWh, com a utilização de baterias com capacidade reduzida. Atendendo que o Rendimento de um Motor Elétrico é bastante elevado, serão considerados os valores de 90% e 95% como

valores mínimos e máximos, respetivamente, para cálculo do consumo do Motor Elétrico. O consumo da Energia Elétrica irá, então, situar-se entre os 242 105,3 Wh e os 255 555,6 Wh. Para o cálculo dos valores de Autonomia a serem atingidos por esta Máquina Principal, irão ser considerados os extremos, tanto do consumo do Motor Propulsor, como da capacidade de Energia a ser armazenada.

A autonomia mínima a ser atingida (quando o consumo for máximo e a capacidade disponível for mínima) é equivalente a 30 minutos a um regime que disponibilize 230 kW ao Propulsor. No entanto, poderá ser atingida uma Autonomia máxima de 52 minutos se for considerado um Rendimento ideal (95%) e uma capacidade disponível assegurada por baterias com densidade de 300 Wh/kg, pelo que se obtém a seguinte *System Area*:

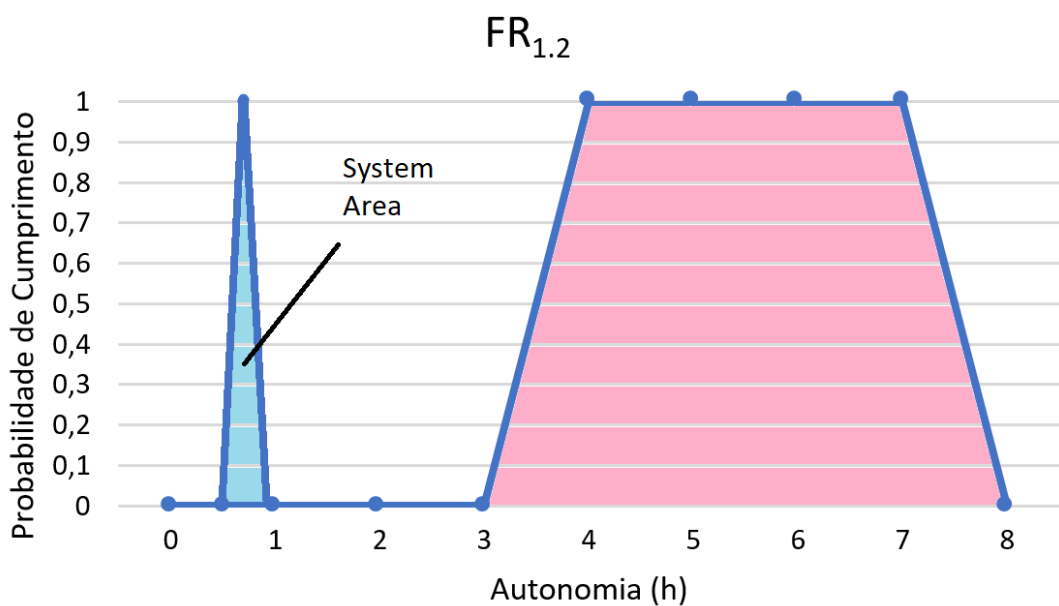


Gráfico 10 - *System Area* do FR1.2 com a utilização exclusiva de Baterias

Visto não ser obtida nenhuma *Common Area*, o conteúdo de Informação presente será infinito, tornando este projeto inaceitável, face ao FR<sub>1.2</sub> selecionado.

#### 5.2.4 Máquina Principal Diesel-Elétrica

Para aplicação de uma Máquina Principal Diesel-Elétrica, terá de ser adaptada a capacidade de embarque de um banco de baterias que funcione em paralelo com um Motor Gerador. Idealmente, poderia ser considerado um arranjo que permitisse que 50% da Energia Elétrica necessária fosse proveniente do Banco de Baterias, enquanto o

restante seria facultado através do Motor Gerador, garantindo assim que, se houvesse uma avaria num dos sistemas de alimentação de Energia Elétrica, o outro sistema ainda teria capacidade para alimentar o Motor Propulsor. No entanto, pela análise dos Sistemas anteriormente avaliados, é natural assumir que a densidade energética presente no combustível embarcado é superior à eventual energia presente num banco de baterias, independentemente dos Rendimentos da Instalação. Irá então, face aos Constrangimentos aplicados, ser priorizada a quantidade de combustível face à quantidade de baterias a serem embarcadas, de modo a ser obtida a maior Autonomia possível.

Atendendo que existe a limitação de 900kg para aplicação da Instalação Propulsora, será necessário definir um limite de massa para os componentes deste sistema. Um Motor Elétrico de potência disponível de 230 kW, como visto anteriormente, poderá pesar até 150 kg. Um Motor Gerador Diesel, no entanto, poderá pesar até 350 kg devido ao acoplamento de um Gerador a um Motor Diesel. Será necessário, ainda, assegurar que 150kg são disponibilizados para os eventuais equipamentos auxiliares que se encontram entre a produção de Energia Elétrica, pelo gerador, e a sua utilização como, por exemplo, Transformadores, Conversores de Frequência e até a própria cablagem necessária à ligação entre os ditos aparelhos. Portanto, para o depósito de combustível e banco de baterias fica-se apenas com 250 kg disponíveis. Com estes 250 kg, poderá ser embarcado até 300 litros de Diesel.

Com a utilização de um Motor Gerador, será necessário calcular o seu rendimento. Tipicamente, o Motor Diesel presente num Sistema Gerador de Energia Elétrica encontra-se otimizado, apresentando Rendimento Térmico entre os 35% e os 40%. O módulo de transformação de Energia Mecânica em Energia Elétrica apresenta Rendimentos semelhantes aos Motores Elétricos, cuja função é o oposto (entre 90% e 95%). Assim sendo, os limites mínimos e máximos de Rendimento a serem obtidos por um Sistema Moto Gerador, obtidos pelo produto dos Rendimentos dos seus componentes, serão 31,5% e 38% respetivamente.

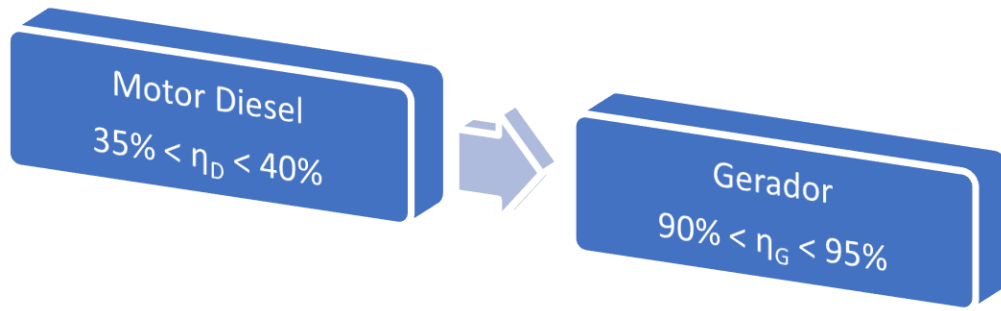


Figura 24 - Sistema Moto Gerador

Com o embarque de 300 litros de Diesel, o Sistema Moto Gerador será capaz de atingir Autonomias máximas entre as 4 horas e 7 minutos e as 4 horas e 57 minutos. Somada a este valor seria a Autonomia disponível pela utilização de Baterias, no entanto, devido aos Constrangimentos de massa aplicados, não será possível colocar um banco de baterias com dimensão apreciável.

A *Common Area* deste Projeto face ao cumprimento do  $FR_{1.2}$  será, então:

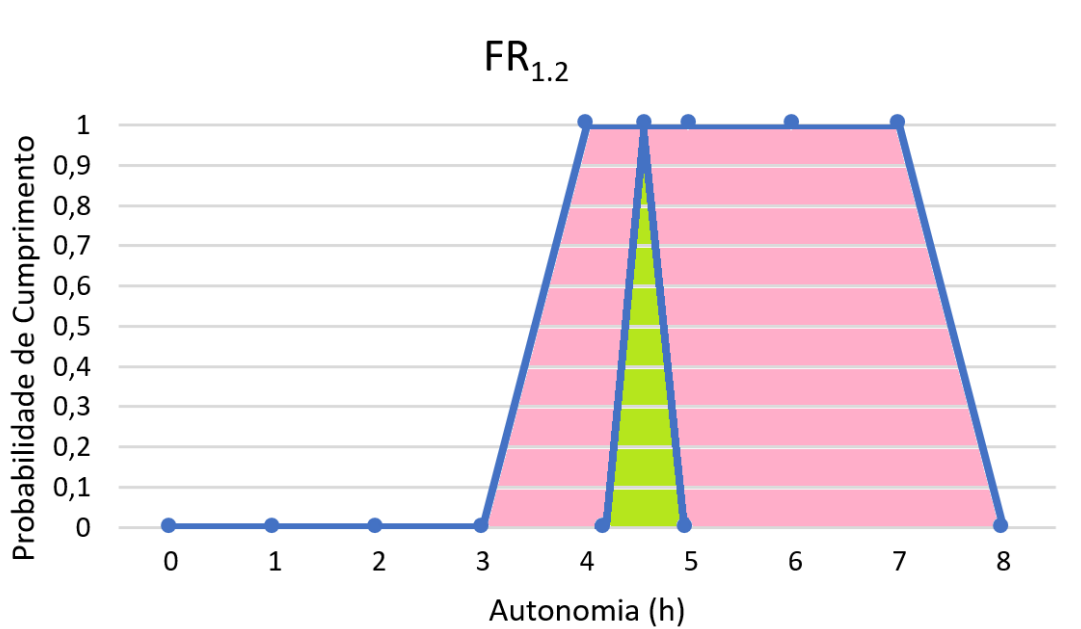


Gráfico 11 - *Common Area* do  $FR_{1.2}$  com a utilização de Diesel-Elétrico sem Baterias

Visto que a *Common Area* se encontra totalmente dentro do *Design Range*, de maneira semelhante à avaliação efetuada à Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa, o conteúdo de Informação necessário para o cumprimento do  $FR_{1.2}$  é nulo. No entanto, torna-se necessária a aplicação de um Banco de Baterias para garantir o

funcionamento da Instalação Propulsora a baixa carga. Para tal, terá de se substituir algum Combustível por baterias.

De modo a garantir que as Baterias possam alimentar o Motor Propulsor durante, pelo menos, 5 minutos, terão de ser embarcados entre 67 kg e 118 kg de Baterias. Este embarque de baterias irá traduzir-se numa diminuição do Combustível disponível fazendo com que a Autonomia desta Instalação Propulsora seja, no limite:

Rendimento	31,5%		38%	
Baterias	67 kg	118 kg	67 kg	118 kg
Combustível	183 kg	132 kg	183 kg	132 kg
Autonomia Total	3h 5m	2h 15m	3h 42m	2h 41m

Onde se poderá obter a seguinte *Common Area* (assinalada a verde):

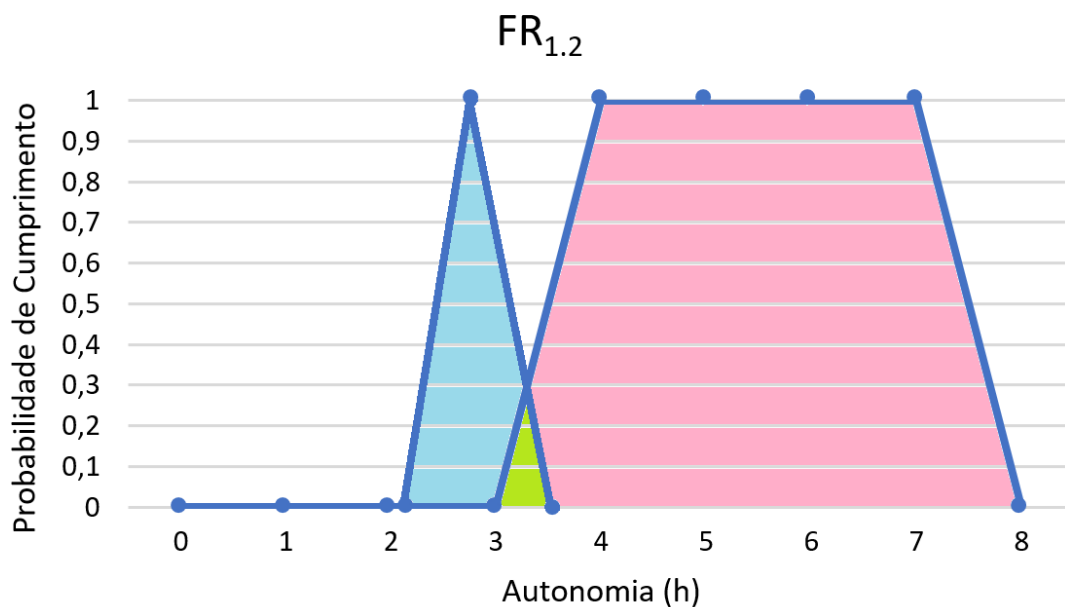


Gráfico 12 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Diesel-Elétrico com Baterias

Cuja Informação pode ser obtida pela Equação 24:

$$I = \log_2 \left( \frac{\frac{45 + 42}{2}}{\frac{42}{2} * 0.3} \right) = 2.788 \quad (24)$$

### 5.2.5 Máquina Principal Turbo-Elétrica

Será agora avaliado o conteúdo de Informação presente no cumprimento do FR<sub>1,2</sub>, por uma Máquina Principal Turbo-Elétrica.

Uma das grandes diferenças entre a utilização de uma Turbina a Gás em vez de um Motor de Combustão Interna Alternativo é a sua relação potência-peso, ou seja, uma Turbina a Gás será capaz de produzir maior potência do que um Motor Diesel de dimensões semelhantes. Por isso, será considerado que a Turbina utilizada numa Máquina Principal Turbo-Elétrica terá, no limite, 150 kg. Com esta limitação de 150 kg para o motor gerador de energia, com a utilização de um Motor Elétrico que também apresentará uma massa de 150 kg e, de maneira semelhante ao efetuado para o Diesel-Elétrico, onde serão assegurados 150 kg para os equipamentos auxiliares do sistema, restam 450 kg para serem aplicados pelo depósito de combustível e pelo Banco de Baterias escolhido. Para assegurar o funcionamento da alimentação do Motor Elétrico através do Banco de Baterias disponível durante 5 minutos, este terá de apresentar uma massa entre os 67 kg, utilizando Baterias de alta Densidade Energética, e os 118 kg, para as Baterias com uma reduzida Densidade Energética.

A aplicação de um Turbo Gerador terá, como no caso de um Moto Gerador, valores de Rendimento inferiores ao de uma utilização de uma Máquina de Combustão Interna como Motor Propulsor. Visto que a Turbina apresenta Rendimentos entre os 15% e os 25%, a associação ao Gerador irá ser traduzida em valores de Rendimento entre os 13,5% e os 23,75%.

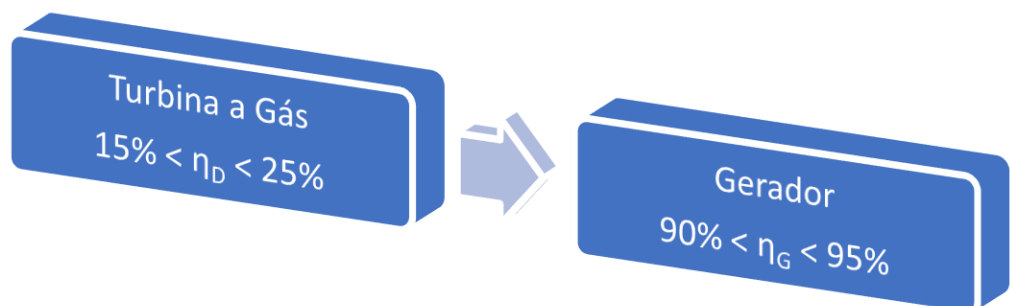


Figura 25 - Máquina Principal Turbo Gerador

Com a utilização de Baterias capazes de fornecer 5 minutos de Autonomia ao VENT-SUP-EN e de uma Máquina Geradora de Energia Elétrica de funcionamento a Combustão Interna Rotativa obtém-se:

Rendimento	13,5%		23,75%	
Baterias	67 kg	118 kg	67 kg	118 kg
Combustível	383 kg	332 kg	383 kg	332 kg
Autonomia Total	2h 46m	2h 25m	4h 48m	4h 11m

O VENT-SUP-EN, com a aplicação de uma Máquina Geradora Turbo-Elétrica associado a um Banco de Baterias poderá, então, atingir valores de Autonomia entre 2 horas e 25 minutos e 4 horas e 48 minutos, obtendo, assim, a seguinte *Common Area*:

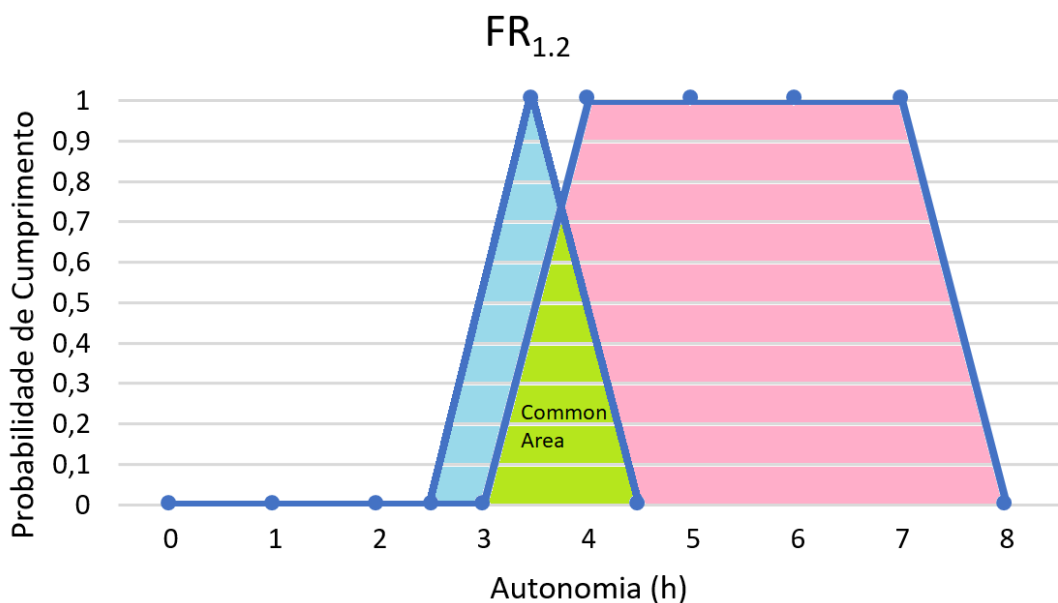


Gráfico 13 - Common Area do FR1.2 com a utilização de Turbo-Elétrico com baterias

Cujo conteúdo de Informação poderá ser calculado:

$$I = \log_2 \left( \frac{\frac{35 + 60 + 48}{2}}{\frac{(60 + 48) * 0.7}{2}} \right) = 0.920 \quad (25)$$

### 5.2.6 Máquina Principal Elétrica com uso de *Fuel Cells*

A aplicação desta tecnologia no VENT-SUP-EN iria traduzir-se numa aplicação ecológica e ambientalmente mais segura do que qualquer uma das Instalações Propulsoras anteriormente abordadas, visto que todas necessitam de um Motor de Combustão Interna para fornecer propulsão ao veio ou para fornecer Energia Elétrica ao sistema. No entanto, devido à tecnologia das *Fuel Cells* ainda não se encontrar muito

desenvolvida, a aplicação de Células com capacidade de fornecerem potências na ordem dos 230 kW ainda se trata de uma aplicação bastante pesada. A título de exemplo, módulos de Células de Combustível capazes de produzir até 120 kW, sem módulos de controlo eletrónicos, apresentam valores de massa de cerca de 900 kg, o que indica que um Módulo superior, capaz de produzir Energia Elétrica com potência de 230 kW iria requerer maior quantidade de massa.

Visto que um dos constrangimentos aplicados se refere à massa da Instalação Propulsora admissível, não será possível continuar a avaliação deste tipo de Máquina Principal, tendo em conta que a simples utilização de Células de Combustível, sem considerar a quantidade de combustível necessário, viola o dito Constrangimento. Portanto, o conteúdo de Informação da aplicação desta Instalação Propulsora é infinito.

### **5.3 FR<sub>1.3</sub>**

Para o cálculo do conteúdo de Informação do FR<sub>1.3</sub> poderia ser avaliada a probabilidade de funcionamento do dispositivo aplicado para permitir o autoadriçamento do VENT-SUP-EN. No entanto, visto que em qualquer um dos projetos a serem avaliados o equipamento necessário a ser aplicado é de fácil aquisição e implementação, não será avaliado o conteúdo de Informação presente aos diversos projetos relativamente ao FR<sub>1.3</sub>.

O conteúdo de Informação presente poderá ser considerado nulo em qualquer um dos projetos avaliados.

### **5.4 Resultado da Avaliação Axiomática**

Com o término da Avaliação dos dois axiomas presentes na Teoria Axiomática, obtém-se os seguintes resultados de conteúdo de informação, sendo todos os projetos desacopláveis, ou desacopláveis redundantes. As soluções a escolher serão as que têm menor conteúdo de informação:

<b>Máquina Principal</b>	<b>Matriz de Projeto</b>	<b>Conteúdo de Informação</b>
Combustão Interna Alternativa	Desacoplável	0
Combustão Interna Rotativa	Desacoplável	0
Elétrica com uso de Baterias	Desacoplável	<i>Infinito</i>
Diesel-Elétrica com Baterias	Desacoplável	2.788
Turbo-Elétrica com Baterias	Desacoplável	0.920
Elétrica com uso de Fuel Cells	Desacoplável	<i>Infinito</i>

*Tabela 1 - Resultados da Avaliação da Teoria Axiomática de Projeto*

O que indica que só dois, dos seis sistemas avaliados, deverão ser escolhidos para aplicação no VENT-SUP-EN: **Máquina Principal de Combustão Interna Alternativa, Máquina Principal de Combustão Interna Rotativa.**



## 6. Conclusão

Este trabalho foi iniciado com a definição do Conceito de Emprego de um VENT-SUP-EN, um meio novo a ser desenvolvido para emprego por parte da EN. De modo a ter alguma base de partida para comparação, foram apresentados alguns VENT-SUP em utilização por Forças Armadas estrangeiras que permitiram idealizar a definição do Sistema Propulsor do VENT-SUP-EN. Posteriormente, com a definição de bases fundamentais do projeto e da Teoria de Projeto a ser adotada, procedeu-se à avaliação das Instalações Propulsoras disponíveis para aplicação neste novo meio da Marinha Portuguesa, ainda em projeto. Nesta avaliação não foram considerados os diferentes propulsores, tendo sido efetuada apenas uma avaliação às Máquinas Principais do Sistema Propulsor seguindo os princípios da Teoria Axiomática de Projeto. A abordagem à Luz da Teoria Axiomática foi feita a um nível elevado de projeto por modo a ser possível efetuar uma avaliação, sem serem necessários muitos dados referentes à propulsão, tendo, no entanto, conhecimento diversificado na área em estudo. Foi determinada uma variedade de soluções de Máquinas Principais aceitáveis para aplicação na Instalação Propulsora a ser adotada pelo VENT-SUP-EN, entrando com os Requisitos Funcionais do projeto a serem cumpridos e com os Constrangimentos impostos sem considerar limites de custo de aquisição e/ou de manutenção. Os Constrangimentos impostos no projeto vieram da fase inicial deste Projeto Concetual, como a limitação de massa aplicada, e de diretivas do Estado Maior da Armada que rege todos os desenvolvimentos de novos projetos a serem efetuados na Marinha Portuguesa.

No final deste trabalho, foi possível encontrar soluções que, com base nos Requisitos Funcionais e dos Constrangimentos aplicados, possam ser introduzidas no projeto VENT-SUP-EN, definindo assim parte da Instalação Propulsora a ser aplicada a esta embarcação. Das diversas Máquinas Principais abordadas, foi possível averiguar que as que cumprem os Requisitos Funcionais definidos e apresentam o menor conteúdo de informação são a aplicação de um Motor Diesel e a aplicação de uma Turbina a Gás para permitir ao VENT-SUP-EN atingir os valores de Potência e Autonomia descritos no trabalho.

De modo a ser possível prosseguir com o desenvolvimento do VENT-SUP-EN, considera-se necessário que seja efetuado: uma decomposição das soluções obtidas para um nível de decomposição inferior onde seja possível a determinação do Motor a ser utilizado; um desenho técnico do casco a ser utilizado com a aplicação da Máquina Principal selecionada, sendo definidos os tanques de combustível a serem utilizados e, eventualmente, um trabalho da otimização das soluções redundantes.

No desenvolvimento deste trabalho, foram adquiridos diversos conceitos não lecionados durante o Curso ministrado na Escola Naval como as teorias de projeto e o funcionamento de um projeto partindo de bases legais e requisitos funcionais com o objetivo de determinar um bloco de conhecimento a ser aplicado fisicamente de modo a cumprir determinados objetivos e missões.

Terminando, concluo que o desenvolvimento deste trabalho veio, de um modo desafiante e motivador, despertar em mim um interesse na área de Engenharia Naval que vai para além da operação e manutenção, áreas que, enquanto oficial da classe de Engenheiros Navais do Ramo de Mecânica, terei um maior contacto.

## Bibliografia

- ADNANES, A. K. (22 de Abril de 2003). *Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion*.
- BANCIU, F., & DRAGHICI, G. (s.d.). *Axiomatic Design Method - Corollaries and Theorems*.
- CAVIQUE, M., FRADINHO, J., GABRIEL-SANTOS, A., GONÇALVES-COELHO, A., & Mourão, A. (s.d.). *The iterative nature of the "zig" and how to define the "hows"*.
- CAVIQUE, M., GONÇALVES-COELHO, A., & MOURÃO, A. (2013). *Decision Criteria for the Design of HVAC Systems for Datacom centres based on cost and losses due to the failure of components*.
- Conceito de Emprego Operacional de Veículos Não Tripulados Superfície. (s.d.).
- Conceito Estratégico Militar. (2014).
- Conceito Estratégico Naval. (2015).
- DILL, G. K. (2008). *Análise da Operação de Células Combustíveis e Microturbinas a Gás em Sistemas de Potência*. Porto Alegre, Brasil.
- Gabinete de Formação Técnico-Naval de EMQ. (1972). *Máquinas Marítimas*. Serviço de Publicações Escolares.
- GONÇALVES-COELHO, A., J.F. MOURÃO, A., & PAMIES-TEIXEIRA, J. (2003). *Axiomatic design as a background for concurrent engineering education and practice*.
- KULAK, O., & KAHRAMAN, C. (Fevereiro de 2004). *Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process*.
- MAN Diesel & Turbo. (s.d.). *Basic Principles of Ship Propulsion*.
- MARTINS, A. J. (2015). *Tomada de decisão em engenharia com base na teoria axiomática – caso de seleção de banco de ensaios para atuadores hidráulicos*.
- Missões das Forças Armadas. (2014). *MIFA*.
- SAVITSKY, & Brown. (1976). *Procedure for Hydrodynamic Evaluation of Planning Hulls in Smooth and Rough Water*.
- SAVITSKY, D. (1964). *Hydrodynamic Design of Planing Hulls*.
- SOFRAS, E., & PROUSALIDIS, J. (2014). *Developing a new methodology for evaluating diesel-electric propulsion*, pp. 63-92.
- STAPERSMA, D., & WOOD, H. (2005). *Matching propulsion engine with propulsor*, pp. 25-32.
- SUH, N. P. (1990). *The Principles of Design*. Oxford: Oxford University Press.
- THOMPSON, M. K. (27-28 de Junho de 2013). *A Classification of Procedural Errors in the Definition of Functional Requirements in Axiomatic Design Theory*.



## **ANEXO A**

### **M1 Segurança e defesa do território nacional (TN) e dos cidadãos**

A segurança e defesa do TN e a salvaguarda da vida dos cidadãos portugueses constituem interesses vitais a garantir. Logo, reclamam das Forças Armadas um conjunto de ações tendentes a fazer face às ameaças e riscos que os visem diretamente, e tenham como ponto de aplicação o TN, ou os cidadãos nacionais, no País ou no estrangeiro.

A palavra-chave para este cenário é, por isso, **prontidão**.

Neste âmbito identificam-se os seguintes subcenários:

#### **M1.1 Defesa convencional do TN**

Entendida num quadro de conflitualidade entre Estados. Apesar de não se identificarem atualmente, ameaças militares clássicas contra a integridade do TN, esta continua a ser responsabilidade constitucional primária das Forças Armadas, dado que envolve a salvaguarda de um valor vital. Nessa medida, o País deve manter uma capacidade própria – forças operacionais apoiadas numa estrutura permanente de comando e controlo – que promova, de forma autónoma ou quando integrada num esforço coletivo, a dissuasão e defesa.

#### **M1.2 Garantia de circulação no espaço interterritorial**

Dada a natureza descontínua do TN, a vigilância, o controlo e a livre circulação entre as suas parcelas está associada a objetivos fundamentais do Estado, como sejam a independência nacional e o exercício da soberania, pelo que se torna necessário assegurar tal desiderato, através da manutenção da liberdade de ação, evitando o isolamento de qualquer uma das suas partes. Este subcenário envolve complementaridade com o anterior, dado que a garantia da livre circulação entre parcelas do TN assenta, também, na defesa dos seus portos e aeroportos.

### **M1.3 Atuação em estados de exceção;**

Este subcenário, prevê o emprego coordenado com as forças e serviços de segurança (FSS) e outras autoridades civis, decorrendo da lei e em conformidade com os mecanismos de articulação a estabelecer.

### **M1.4 Evacuação de cidadãos nacionais em áreas de crise;**

Este subcenário, envolve a evacuação de cidadãos nacionais, cuja segurança esteja posta em causa fora do TN, por situações de tensão ou crise, através de ações autónomas ou eventualmente coligadas.

### **M1.5 Extração/Proteção de contingentes e Forças Nacionais Destacadas (FND);**

O Estado tem de garantir a segurança daqueles que, em seu nome, se dispuseram a defender os seus interesses, face a evoluções desfavoráveis de determinadas intervenções. O planeamento militar não pode deixar de acautelar, em todas as circunstâncias, a capacidade de acorrer às modalidades de ação mais perigosas.

### **M1.6 Ciberdefesa;**

Este subcenário diz respeito à intervenção das Forças Armadas no âmbito da Ciberdefesa, através da aplicação de medidas de segurança que garantam a salvaguarda da informação e a proteção das infraestruturas de Comunicações e dos Sistemas de Informação das Forças Armadas contra ciberataques, bem como, o apoio, no caso de um ciberataque, na proteção e defesa das infraestruturas críticas nacionais e do governo eletrónico do Estado.

### **M1.7 Cooperação com as forças e serviços de segurança.**

Este subcenário diz respeito ao emprego das Forças Armadas em cooperação, nos termos da lei, com as FSS em missões de combate ao terrorismo, narcotráfico, defesa de pontos sensíveis, cibersegurança e defesa NBQR, entre outras.

## **M2 Defesa coletiva:**

### **M2.1 Defesa do território das nações aliadas.**

O conceito de Defesa Coletiva deriva do artigo 5º do Tratado do Atlântico Norte e tem por finalidade garantir o envolvimento coletivo na defesa militar das nações aliadas em caso de ataque a um ou mais dos seus membros, o que pressupõe a preparação de um dispositivo de defesa credível, capaz de fazer face a ameaças convencionais ou não convencionais. De forma idêntica, deverá ser considerada a cláusula de solidariedade do Tratado de Lisboa, no que respeita à UE. Assim, o poder de dissuasão da OTAN e da UE torna-as um elemento estruturante da política de segurança e defesa nacional, num quadro de interdependência coletiva, da qual resulta a responsabilidade e obrigação de participação ativa em caso de necessidade.

A palavra-chave para este cenário é **credibilidade**.

## **M3 Exercício da soberania, jurisdição e responsabilidades nacionais:**

A afirmação da soberania nacional e a concretização das responsabilidades assumidas, através da ratificação de convenções internacionais, são funções do Estado cometidas às Forças Armadas, nomeadamente, a vigilância, a busca e o salvamento marítimo e aéreo e a fiscalização e o policiamento aéreo de áreas sob soberania e jurisdição nacional. Este cenário inclui ainda o apoio à busca e salvamento terrestre e, quando determinado, a vigilância terrestre.

A palavra-chave para este cenário é **presença**.

### **M3.1 Vigilância e controlo, incluindo a fiscalização e o policiamento aéreo, dos espaços sob soberania e jurisdição nacional;**

Atendendo às suas capacidades operacionais, as Forças Armadas têm, por lei, atribuídas competências de vigilância e controlo, incluindo a intervenção, fiscalização e o policiamento aéreo, de espaços sob soberania e jurisdição nacional, por forma a garantir salvaguarda dos interesses nacionais de âmbito económico, ambiental e de prevenção de ameaças transnacionais. Inclui-se ainda neste subcenário, a vigilância terrestre, quando determinado.

### **M3.2 Busca e salvamento;**

Portugal, além da satisfação das necessidades nacionais, assumiu responsabilidades internacionais no âmbito da busca e salvamento marítimo e da busca e salvamento aéreo em áreas que se inscrevem no EEINP. Inclui-se ainda neste subcenário, o apoio à busca e salvamento terrestre.

### **M3.3 Segurança das linhas de comunicação no EEINP.**

A segurança das linhas de comunicação que intersejam os espaços adjacentes ao território nacional é fundamental para garantir o normal abastecimento do País e a estabilidade da circulação comercial internacional. Para além do interesse nacional específico, a segurança das rotas internacionais no EEINP, representa um contributo significativo para a afirmação de Portugal como coprodutor de segurança internacional.

## **M4 Segurança Cooperativa:**

A participação das Forças Armadas em ações de nível multinacional tendentes à resolução de crises internacionais tem como finalidade:

- Promover a paz e estabilidade na comunidade internacional;
- Fazer face a desastres humanitários;
- Impor o cumprimento do Direito Internacional.

Estas ações visam promover a segurança cooperativa e apoiar a política externa do Estado em espaços regionais com implicações estratégicas para Portugal. Esta tipologia de intervenções pode ter lugar no quadro dos tratados internacionais firmados por Portugal ou no âmbito de eventuais coligações “ad-hoc”. A participação de Portugal neste tipo de cenários permite a afirmação da identidade nacional numa lógica de “soberania de serviço”, em que o Estado Português se disponibiliza para tomar parte nas ações coletivas tendentes à criação de um clima favorável à paz e segurança internacional, do qual é diretamente beneficiário.

As palavras-chave para este cenário são: **interoperabilidade** e **projeção**.

Neste âmbito identificam-se os seguintes subcenários:

#### **M4.1 Operações de Resposta a Crises no âmbito da OTAN (não artigo 5º);**

Portugal beneficia e coopera num esforço global de segurança cooperativa. As ameaças, riscos e a necessidade de promover a estabilização em áreas dentro da fronteira de segurança da Aliança, são sempre consideradas num quadro comum por todos os que a integram. Proporcionalmente à dimensão e interesses de cada um, a afirmação da OTAN como "produtora de segurança" global, faz-se com o contributo de todos os países, incluindo Portugal.

#### **M4.2 Outras operações e missões no âmbito da OTAN;**

Deriva dos compromissos assumidos para, em operações e missões em tempo de paz, permitir ao País integrar forças e estruturas permanentes da

OTAN, para policiamento aéreo, vigilância aeronaval e afirmação dos interesses da aliança.

#### **M4.3 Operações e missões no âmbito da UE;**

Num esforço contínuo de aprofundar e consolidar a Política Comum de Segurança e Defesa, Portugal participa em operações e missões no âmbito da UE, a fim de contribuir para a promoção da paz e da segurança internacional.

#### **M4.4 Operações de Paz no âmbito da ONU e CPLP;**

O esforço desenvolvido, em especial nas últimas décadas, em que se afirmou a competência e determinação do País, levou a que Portugal fosse considerado como um parceiro fiável e credível dentro da ONU. Também no âmbito da CPLP, Portugal tem mantido uma atitude pró-ativa, em forte ligação com os restantes países, contribuindo para a coesão e a significância crescente desta organização. A vontade de prosseguir na ONU e aprofundar esta dimensão na CPLP é, naturalmente, não apenas do interesse, mas, acima de tudo, da afirmação da vontade de Portugal participar na promoção da paz e segurança global.

#### **M4.5 Operações e missões no âmbito de acordos bilaterais e multilaterais.**

Conjuntamente, Portugal promove acordos e assume compromissos com um ou mais países, identificando oportunidades, parcerias estratégicas e sinergias, para uma colaboração que não se esgota nas alianças e organizações a que pertence. Esta abertura em procurar estar presente e colaborar em esforços locais, regionais ou globais de segurança, são a demonstração que, também através das suas Forças Armadas, Portugal

procura afirmar-se como um ator ativo e proactivo na busca de soluções para uma segurança melhor e mais estável.

## **M5 Apoio ao desenvolvimento e bem-estar:**

Para além do serviço público, de valor intangível, inerente ao desempenho das tarefas relativas à defesa nacional, as Forças Armadas desempenham outras missões que reforçam a natureza de uma instituição ao serviço do bem comum, revelando-se essenciais para a consecução dos objetivos nacionais de segurança e desenvolvimento. Neste âmbito, destacam-se:

- As ações de cooperação nas atividades de proteção civil;
- O apoio à satisfação das necessidades básicas da população;
- A defesa do património nacional;
- A investigação e desenvolvimento (I&D), nomeadamente no âmbito da cartografia, hidrografia e oceanografia;
- O apoio à pesquisa e preservação de recursos naturais;
- O apoio na preservação do ambiente e da segurança marítima e aérea (safety).

A palavra-chave para este cenário é **disponibilidade**.

Neste âmbito, identificam-se os seguintes subcenários:

### **M5.1 Apoio à Proteção e Salvaguarda de pessoas e bens;**

Inclui, entre outras, intervenções no âmbito da proteção NBQR, apoio sanitário, evacuações médicas, transporte de órgãos para transplante, engenharia de construções, combate a incêndios, combate à poluição, segurança da navegação marítima e aérea, apoio em caso de catástrofes naturais e outras emergências complexas, e ainda em situações de ciberataques que afetem as infraestruturas críticas nacionais.

## **M5.2 Apoio ao desenvolvimento.**

Inclui, entre outras, atividades de apoio ao desenvolvimento económico, científico e cultural, defesa e salvaguarda do património histórico, proteção do ambiente marinho, investigação científica, hidrografia/oceanografia, informação geográfica, acessibilidades e meteorologia.

## **M6 Cooperação e assistência militar:**

Este cenário tem por finalidade apoiar a política externa do Estado num quadro restrito de relações internacionais de cooperação. Abrange um vasto espectro de ações, que vão desde a formação e treino técnico, até à assistência militar, passando pela assessoria a instituições militares e órgãos de comando de países terceiros.

A palavra-chave para este cenário é **credibilidade**.

Neste âmbito, identificam-se os seguintes subcenários:

### **M6.1 Cooperação e assistência militar de natureza bilateral e multilateral;**

Em especial no seio da CPLP, mas estendendo-se a outros países num âmbito bilateral ou multilateral, Portugal tem assumido um compromisso firme, de forma continuada nas três últimas décadas, de estar lado a lado com os parceiros fundamentais na cooperação técnico-militar. A edificação de capacidades no âmbito da defesa entre os países amigos é a garantia de uma melhor defesa para todos e da construção de um sistema em que todos participam e beneficiam mutuamente. É um subcenário que implica ações dentro dos países signatários dos acordos de cooperação, recebendo e colocando cooperantes, estudantes, projetos, estruturas, investigação e desenvolvimento, assessorias técnicas, até ao uso de pequenas unidades e envio de meios para construir e sustentar projetos.

## **M6.2 Ações no âmbito da Reforma do Sector de Segurança de outros países.**

Inclui, mas não se esgota, nas atividades de *Training & Mentoring* previstas nas atuais estratégias da OTAN e UE. São usadas equipas de mentores, de cooperantes ou de conselheiros (incluindo o possível envio de militares isolados) apoiados, ou não, por pequenos destacamentos de apoio de serviços e de proteção/segurança (conforme o ambiente estratégico em causa seja considerado mais hostil ou mais permissivo) e que geralmente se integram em estruturas internacionais mais amplas com uma estratégia cooperativa para o desenvolvimento das Forças Armadas e de Segurança nos países apoiados.



## ANEXO B

### Corolários:

**Corolário 1** *Desacoplamento de um projeto Acoplado*: Desacoplar ou separar partes ou características da solução se houver FRs acoplados ou que ficam interdependentes no projeto proposto.

**Corolário 2** *Minimização de FRs*: Minimizar o número de FRs e Constrangimentos.

**Corolário 3** *Integração das partes físicas*: Integrar capacidades do projeto em partes físicas únicas, se essas partes cumprirem os FRs e Constrangimentos definidos.

**Corolário 4** *Uso da normalização*: Usar partes normalizadas ou trocáveis, se essas partes cumprirem os FRs e os Constrangimentos definidos.

**Corolário 5** *Uso de Simetria*: Usar formas ou componentes simétricos se cumprirem os FRs e os Constrangimentos definidos.

**Corolário 6** *Maior Tolerância*: Especificar a maior tolerância admissível quando definindo FRs.

**Corolário 7** *Projeto Desacoplado com menos Informação*: Procurar atingir um Projeto Desacoplado que requeira menos Informação que um Projeto Acoplado a satisfazer FRs.

**Corolário 8** *Reangularidade efetiva de um escalar*: A Reangularidade efetiva  $R$  para uma matriz de acoplamento escalar é a unidade.

### Teoremas:

**Teorema 1** *Acoplamento devido a número insuficiente de DPs*: Quando o número de DPs for inferior ao número de FRs, o projeto será acoplado ou nem todos os FRs poderão ser satisfeitos.

**Teorema 2** *Desacoplamento de um projeto Acoplado*: Quando um projeto for Acoplado devido a ter um maior número de FRs do que DPs, pode ser desacoplado através da adição de novos DPs até igualar o número de FRs.

**Teorema 3** *Projeto Redundante*: Quando existem mais DPs do que FRs, o projeto é Redundante ou Acoplado.

**Teorema 4** *Projeto Ideal*: Num projeto ideal, o número de FRs é igual ao número de DPs.

**Teorema 5** *Necessidade de novo projeto*: Quando um dado grupo de FRs for alterado pela adição de um novo FR ou pela substituição de um FR por um novo FR ou for substituído por um novo grupo de FRs, a solução obtida para a satisfação do grupo de FRs inicial não poderá satisfazer o novo grupo de FRs. Portanto será necessário encontrar a solução do novo projeto.

**Teorema 6** *Independência da sequência*: O conteúdo de Informação presente num projeto Desacoplado é independente da sequência pela qual são definidos/alterados os DPs de modo a satisfazer os dados FRs.

**Teorema 7** *Dependência da ordem em projetos Acoplados e Desacopláveis*: O conteúdo de Informação presente num projeto Acoplado ou Desacoplável é dependente da sequência pela qual são definidos/alterados os DPs de modo a satisfazer os dados FRs.

**Teorema 8** *Independência e Tolerância*: Um projeto é Desacoplado quando a Tolerância definida é superior a  $\sum_{i=1}^n \left( \frac{dFR_i}{dDP_j} \right) \Delta DP_j$ , neste caso, podem ser descartadas as relações fora da diagonal da matriz de projeto.

**Teorema 9** *Projeto para Produção*: Para um projeto ser produzido, a matriz de projeto  $[A] \times [B]$  ( $[B]$  é a matriz de produção) tem de dar uma matriz diagonal ou triangular. Quando uma destas matrizes ( $[A]$  ou  $[B]$ ) representar um projeto acoplado, o produto não poderá ser produzido.

**Teorema 10** *Modularidade das medidas de independência*: Supondo que uma Matriz de Projeto (MP) pode ser dividida em submatrizes quadradas diagonais. A Reangularidade e Semangularidade para (MP) são iguais ao produto das medidas correspondentes para as submatrizes diagonais.

**Teorema 11** *Invariância*: A Reangularidade e Semangularidade de uma Matriz de Projeto não variam segundo a ordem atribuída aos FRs e DPs, desde que a ordenação preserve as relações entre DPs e FRs.

**Teorema 12** *Soma da Informação*: Uma soma de Informação é também Informação, assegurando que as probabilidades condicionais são utilizadas quando os DPs não forem estatisticamente independentes.

**Teorema 13** *Conteúdo de Informação de um Sistema*: Se cada DP for estatisticamente independente dos outros DPs, o conteúdo de Informação do Sistema total será a soma da Informação de todos os casos individuais associados ao grupo de FRs a satisfazer.

**Teorema 14** *Conteúdo de Informação de Projetos Acoplados vs. Desacoplados*: Quando houver uma alteração de estado no Domínio Funcional de FRs, a Informação necessária para a alteração é superior para um projeto Acoplado do que para um projeto Desacoplado.

**Teorema 15** *Produção de Projeto*: Quando o sistema de produção compromete a independência dos FRs do novo produto, ou se altera o projeto do produto, ou é

selecionado outros processos de produção, com o objetivo de manter a independência dos FRs dos produtos.

**Teorema 16** *Igualdade do conteúdo de Informação*: Todo o conteúdo de Informação relevante para o projeto tem a mesma importância independentemente da sua origem física e não poderá ser sujeito a nenhum tipo de peso.

**Teorema 17** *Importância de Decisões a alto nível*: A qualidade do Projeto depende da definição dos FRs e do mapeamento efetuado entre os domínios. Más decisões tomadas a um nível mais alto não poderão ser retificadas por decisões tomadas a níveis inferiores.

**Teorema 18** *Melhor Projeto para Grandes Sistemas*: O melhor projeto, de um grupo de projetos, poderá ser escolhido se for conhecido, a priori, o grupo de FRs que o sistema terá de satisfazer.

**Teorema 19** *Necessidade de um Melhor Projeto para Grandes Sistemas*: Quando não se tem conhecimento de todos os *subsets* de FRs que um Grande Sistema terá de satisfazer ao longo da sua vida, a priori, não há garantia que um projeto em específico tenha sempre o mínimo de Informação, portanto não será possível garantir que o mesmo projeto é sempre o melhor mesmo que satisfaça o 1º Axioma e todos os FRs.

**Teorema 20** *Aumentar a probabilidade de sucesso*: A probabilidade de escolher o melhor projeto para um Grande Sistema aumenta se os *subsets* de FRs apresentados inicialmente se aproximarem dos FRs que o sistema terá de satisfazer ao longo da sua vida.

**Teorema 21** *Flexibilidade Infinita vs. Completude*: O Grande Sistema com uma Flexibilidade Infinita poderá não representar o melhor projeto quando o Grande Sistema for utilizado numa situação onde são conhecidos, a priori, todos os *subsets* de FRs.

**Teorema 22** *Complexidade de Grandes Sistemas*: Um Grande Sistema não é necessariamente complexo se tiver uma grande probabilidade de satisfazer os FRs especificados para o sistema.

**Teorema 23** *Qualidade do Projeto*: A qualidade do Projeto de um Grande Sistema é determinada pela qualidade da base de dados, da seleção de FRs e do processo de mapeamento utilizados pelo projetista.