



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica De Energia E Automação**



## **Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de iões de lítio**

**PEDRO MIGUEL SAMPAIO PEREIRA**  
(Mestre em Engenharia Naval Ramo de Armas e Eletrónica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Eletrotécnica Ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientador (es):

Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís  
Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves

Júri:

Presidente:

Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto

Vogal:

Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte

**Novembro de 2022**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica De Energia E Automação**



## **Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de iões de lítio**

**PEDRO MIGUEL SAMPAIO PEREIRA**  
(Mestre em Engenharia Naval Ramo de Armas e Eletrónica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Eletrotécnica Ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientador (es):

Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís  
Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves

Júri:

Presidente:

Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto

Vogal:

Doutor Pedro Miguel Neves da Fonte

**Novembro de 2022**

**Dissertação realizada sob orientação de:**

**Doutor Ricardo Jorge Ferreira Luís**

Professor Adjunto do Departamento  
de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

**Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves**

Professor Adjunto do Departamento  
de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

“Nothing worth having comes easy”

**Theodore Roosevelt (27-10-1858 – 06-01-1919)**



## RESUMO

Numa geração assinalada pelo reconhecimento do impacto das alterações climáticas e do início de um esforço global para travar o aquecimento global através do Acordo de Paris, torna-se crítico enfrentar este desafio, procurando soluções alternativas sustentáveis.

Esta dissertação baseia-se na hipótese de que é possível melhorar a eficiência energética de um navio, com configuração diesel-elétrico, adicionando à atual instalação electroprodutora um sistema de armazenamento de energia em modo híbrido paralelo. Para validar esta hipótese, este trabalho tem como objetivo analisar o caso de estudo do navio NRP *Almirante Gago Coutinho*, utilizando dados reais de navegação e de consumo energético e elaborar uma simulação numérica que recrie o navio no seu modo convencional e no modelo híbrido alternativo.

A simulação numérica foi elaborada por forma a replicar os parâmetros dos grupos electroprodutores reais do navio, com o objetivo de extrair os dados de consumo energético o mais fidedigno possível. Na versão híbrida proposta, o banco de baterias de iões de lítio foi dimensionado por forma a cumprir os requisitos específicos do navio, de modo a possibilitar a maximização da eficiência dos grupos electroprodutores.

Nesta dissertação foi possível demonstrar que através de um investimento relativamente baixo e um trabalho tecnológico exequível, é possível aumentar a eficiência energética, trazendo vantagens ambientais assim como financeiras para o investidor sem compromisso para o cumprimento da missão do navio.

**Palavras-chave:** Descarbonização, Navio híbrido, Eficiência Energética, Sistemas de Armazenamento de Energia.



## **ABSTRACT**

We live in an era impacted by the recognition of the climate changes and the beginning of an effort to confront this global challenge with the name of Paris Agreement. It is critical to face this challenge by investigating newer and more sustainable fossil fuel alternatives.

This dissertation is based on the hypothesis that it is possible to raise energy efficiency of a diesel-electric ship configuration by adding a lithium-ion energy storage system to function as a hybrid parallel ship. To validate this hypothesis, this work aims to conduct the case study of the NRP *Almirante Gago Coutinho* ship, using real navigation and energy consumption data and elaborate a numerical simulation that recreates the ship in its conventional mode and the alternative hybrid model.

A numerical simulation was designed to replicate the real parameters of the ship's generator sets with the aim of extracting energy consumption data as consistent as possible. In the hybrid version the ion battery bank was dimensioned to meet the specific needs of the ship to enable generator sets to maximize its energy efficiency.

In this dissertation it was possible to demonstrate that through a low investment and a feasible technological work, it is possible to increase the energy efficiency. Bringing environmental benefits as well as financial for the investors without compromising the ship's mission.

**Keywords:** Decarbonization, Hybrid Ship, Energy Efficiency, Energy Storing System.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores, Ricardo Luís e Miguel Chaves, por me assegurarem tutoria profissional e exemplar.

À minha namorada, Joana Vieira, por ser o meu porto seguro independentemente das circunstâncias.

A toda a minha família pelo amor, apoio incondicional e pelos valores transmitidos que de tanto me orgulho.

Aos meus colegas, Alexandre Goulão e Paul Druzko. Foi convosco que partilhei os bons e maus momentos durante estes dois anos. Foi um prazer conhecer-vos e trabalhar ao vosso lado, espero encontrar-vos novamente, desta vez na vida profissional.

À Marinha Portuguesa por, gentilmente, partilhar os dados do NRP *Almirante Gago Coutinho* e proporcionar-me todas as condições para concretizar este mestrado.



## LISTA DE ABREVIATURAS

- AC – Corrente alternada (de *alternated current*)
- BMS – Sistema de gestão da bateria (de *battery management system*)
- BMU – Unidade de gestão da bateria (de *battery management unit*)
- BSFC – Consumo de combustível específico ao freio (de *brake specific fuel consumption*)
- CSC – Circuitos de supervisão de células (de *cell supervisory circuit*)
- DC – Corrente contínua (de *direct current*)
- DoD – Profundidade de descarga (de *Depth of Discharge*)
- DP – Posicionamento dinâmico (de *dynamic positioning*)
- EC – Comissão Europeia (de *European Comission*)
- FCEV - Veículo elétrico com célula de combustível (de *Fuel Cell Electric Vehicle*)
- FP – Fator de Potência
- GEE – Gases de efeito de estufa
- GTO – Tiristor de fecho de porta (de *gate turn-off thyristor*)
- HVDC BUS – Barramento de alta tensão DC (de *high voltage DC bus*)
- IGBT – Transistor bipolar de porta isolada (de *Insulated Gate Bipolar Transistor*)
- IMO - Organização Marítima Internacional (de *International Maritime Organization*)
- MCI – Motor de combustão interna
- MOSFET – Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor (de *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)
- NRP – Navio da República Portuguesa
- PEM - Membrana de intercâmbio de prótons (de *proton exchange membrane*)
- PID – Proporcional, integral e derivativo
- QEA – Quadro elétrico auxiliar
- QEP – Quadro elétrico principal
- SAE – Sistemas de armazenamento de energia

SC – Semicondutor

SoC – Estado de carregamento (de *state of charge*)

SoH – Estado de condição (de *State of Health*)

$t_r$  – Tempo restante de funcionamento (de *remaining runtime*)

VE - Veículo elétrico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  - Área abaixo da linha de água [ m<sup>2</sup> ]

$CO_2$  - Dióxido de Carbono

$C_t$  - Coeficiente da resistência total do casco

$f$  - Frequência [Hz]

$H_2$  - Hidrogénio

$H_2O$  - Água

$k$  - Coeficiente de ajuste

$LiCoO_2$  - Óxido de lítio cobalto

$MP$  - Potência do motor (de *Motor Power*) [kW]

$n_s$  - Velocidade síncrona [rpm]

$O_2$  - Oxigénio

$p$  - Pares de pólos

$R_T$  - Resistência total do casco [kg]

$S$  - Potência aparente [kVA]

$S_{QEA}$  - Potência Aparente do Quadro Elétrico Auxiliar [kVA]

$S_{GD1}, S_{GD2}, S_{GD3}, S_{GD4}$  - Potência aparente do grupo eletrogéneo 1, 2, 3 e 4 [kVA]

$S_{MEPs}$  - Potência aparente dos Motores Elétricos Propulsores [kVA]

$S_T$  - Potência aparente total [kVA]

$t$  - Tempo [s]

$T$  - Período [s]

T1 e T2 – Transístores 1 e 2

$T1_{OFF}$  e  $T2_{OFF}$  – Transístor 1 e 2 não conduzem

$T1_{ON}$  e  $T2_{ON}$  – Transístor 1 e 2 conduzem

USD – Dólar Americano

$U_{bat}$  – Tensão aos terminais da bateria [V]

$U_{dc}$  – Tensão no barramento HVDC

$V$  - Velocidade do navio [ m/s ]

$v_{rms\ ph-ph}$  - Tensão eficaz entre fases [V]

$VS$  - Velocidade do navio em nós (de *vessel speed*) [kt]

$\delta t$  - Duty Cycle

$\delta_{T1}$  e  $\delta_{T2}$  - Duty Cycle do transístor 1 e 2

$\rho$  - Densidade da água [ kg/m<sup>3</sup> ]

$e^-$  - Eletrão

°C – Graus celsius

~ - Aproximadamente

# ÍNDICE

## Capítulo 1

<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 – Enquadramento .....	1
1.1.1 – Acordo de Paris .....	2
1.1.2 – Setor do transporte marítimo.....	3
1.2 – Motivação .....	4
1.3 – Caso de estudo .....	4
1.4 – Estrutura da tese.....	5
1.5 – Objetivos.....	6

## Capítulo 2

<b>Estado da arte da eletrificação do setor dos transportes .....</b>	<b>9</b>
2.1 – Introdução histórica .....	9
2.1.1 – Motor de combustão interna e industrialização .....	9
2.1.2 – Acordo de Paris .....	10
2.2 – Eletrificação nos transportes .....	10
2.2.1 – Transmissão diesel-elétrico .....	11
2.2.2 – Transmissão Híbrida .....	12
2.2.2.1 – Mapa de eficiência de motor de combustão interna.....	14
2.2.3 – Transmissão elétrica.....	16
2.2.4 – Veículo elétrico com célula de combustível (VECC ou FCEV).....	17
2.3 – Sistemas de armazenamento de energia.....	20
2.3.1 – Baterias de iões de lítio ( <i>Li-ion</i> ).....	20
2.3.2 – Flow Batteries .....	24
2.4 – <i>Battery Management System</i> (BMS).....	26
2.4.1 – Topologia .....	27
2.4.2 – Monitorização .....	28
2.4.3 – Controlo de carga e descarga .....	28
2.5 – Sistemas de conversão de energia elétrica .....	30
2.5.1 – Conversor DC/DC .....	31

2.5.2 – Conversores AC/DC e DC/AC .....	33
---	----

### **Capítulo 3**

#### **Caso de estudo NRP *Almirante Gago Coutinho*..... 35**

3.1 – Diagrama elétrico geral .....	35
3.2 – Produção de energia elétrica.....	36
3.2.1 – Grupos eletrogéneos .....	36
3.3 – Gestão do comissionamento dos grupos eletrogéneos .....	37
3.3.1 – Gestão atual do comissionamento de grupos.....	37
3.4 – Gestão proposta para melhorar a eficiência energética .....	40
3.4.1 – Reserva energética .....	40
3.4.2 – Restrição do intervalo de funcionamento dos grupos eletrogéneos.....	40
3.4.3 – Compensação do fator de potência .....	41
3.5 – Motores elétricos propulsores .....	43
3.5.1 – Método empírico - Velocidade do navio em função da potência .....	44
3.5.2 – Método teórico - Velocidade do navio em função da potência .....	47
3.6 – Carga auxiliar do navio .....	49
3.7 – Perfis de utilização .....	50
3.7.1 – Navegação corrida .....	50
3.7.2 – Operações oceanográficas 1 .....	51
3.7.3 – Operações oceanográficas 2 .....	52
3.7.4 – Manutenção de boias .....	53
3.7.5 – Análise dos perfis de carga .....	54

### **Capítulo 4**

#### **Dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia .....**

4.1 – Requisitos para o SAE.....	55
4.1.1 – Tipologia a utilizar.....	56
4.2 – Energia.....	57
4.2.1 – Autonomia .....	57
4.2.1.1 – Navio atracado.....	57
4.2.1.2 – Autonomia em função da velocidade (gráfico) .....	58

4.2.1.3 – Autonomia em percursos nos Portos de Lisboa e Setúbal .....	59
4.2.1.4 – Autonomia em manobras de atracação .....	60
4.3 – Cenários para carregamento.....	62

## Capítulo 5

<b>Modelização.....</b>	<b>65</b>
5.1 – Visão geral .....	65
5.2 – Modelo .....	66
5.2.1 – Considerações prévias .....	66
5.2.2 – Painel de Controlo.....	68
5.2.3 – Grupos produtores de energia e consumo de combustível.....	70
5.2.4 – Grupo de baterias de iões de lítio .....	74
5.2.4.1 – P Control .....	75
5.2.4.2 – Grid Sync .....	78
5.2.4.3 – Subsistema SAE.....	79
5.2.4.4 – Battery Dynamics .....	80
5.2.5 – Motores elétricos propulsores .....	81
5.2.6 – Carga Auxiliar do navio .....	82
5.2.7 – Input data.....	83
5.2.8 – <i>Phasor Model</i> .....	84

## Capítulo 6

<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>85</b>
6.1 – Resultados.....	85
6.1.1 – Perfil Navegação Corrida .....	85
6.1.2 – Perfil Operações Oceanográficas 1 .....	87
6.1.3 – Perfil Operações Oceanográficas 2 .....	89
6.1.4 – Perfil Manutenção Boias .....	91
6.2 – Discussão .....	93
6.2.1 – Benefícios mensuráveis.....	93
6.2.2 – Benefícios não mensuráveis .....	95

6.2.2.1 – Horas de funcionamento.....	95
6.2.2.2 – Degradação mecânica dos motores devido a exposição constante a cargas leves 96	
6.2.2.3 – Redução do perfil acústico .....	96
6.2.2.4 – Percurso de porto em modo elétrico.....	96
6.2.3 – Investimento e retorno financeiro.....	97
6.2.4 – Resultados vs metas de emissões de dióxido de carbono para 2030 .....	98

## **Capítulo 7**

<b>Conclusões.....</b>	<b>101</b>
7.1 – Conclusões Gerais .....	101
7.2 – Desenvolvimentos futuros.....	102
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>103</b>

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens das baterias iões de lítio. ....	22
Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens das VRB. ....	26
Tabela 2.3 - Classificação de conversores DC-DC .....	31
Tabela 2.4 - Modos de funcionamento do conversor DC-DC e suas condições. ....	33
Tabela 3.1 - Consumo de combustível dos grupos eletrogéneos em função da carga [51]. ....	39
Tabela 3.2 - Registos horários do painel de instrumentação dos motores propulsores à esquerda e registos horários do diário de navegação à direita. ....	44
Tabela 3.3 - Amostragem horária de consumo dos motores e velocidade por regime de rpm (incremento de 10 rpm) .....	46
Tabela 3.4 - Formato dos registos horários dos parametros dos grupos em comissionamento. ....	49
Tabela 3.5 – Perfis de utilização do navio e breve descrição. ....	50
Tabela 4.1 - Detalhes dos requisitos do SAE. ....	55
Tabela 4.2 - Autonomia em tempo e distância em função da velocidade do navio .....	58
Tabela 5.1 - Modos de funcionamento possíveis no modelo <i>Matlab Simulink</i> . ....	70
Tabela 5.2 - Fatores de emissão de por tipo de combustível. ....	74
Tabela 6.1 – Resumo dos resultados das simulações em modo <i>Only Diesel</i> e modo <i>Hybrid</i> . .	94
Tabela 6.2 - Extrapolação dos resultados da melhoria de eficiência energética a 15 anos. ....	98



# Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolução temporal do consumo de combustíveis fósseis na última década [1]. ....	1
Figura 1.2 - Evolução temporal das emissões de $CO_2$ de origem fóssil nos últimos 250 anos [1]. .....	2
Figura 1.3 - Evolução temporal da distribuição energética para produção de eletricidade na União Europeia (UE) [1]. .....	3
Figura 1.4 - NRP <i>Almirante Gago Coutinho</i> . .....	5
Figura 2.1 - Arranjo geral de um sistema propulsor diesel elétrico de 2 veios propulsores (imagem da cortesia de Cristian Vásquez em [14]). .....	11
Figura 2.2 - Classificação de veículos híbridos. Imagem cortesia de Fellow Chan [16]. .....	13
Figura 2.3 - Mapa BSFC de motor gasolina de 4 tempos, cortesia de Mahdi Mohammadpour and Homer Rahnejat em [20]. .....	15
Figura 2.4 - Mapa BSFC expectável para um MCI cujo funcionamento é de velocidade constante (figura 2.3 adaptada). .....	15
Figura 2.5 - Diagrama básico para um veículo puramente elétrico, imagem cortesia de Evannex [21]. .....	16
Figura 2.6 – Imagem ilustrativa da aplicação de <i>ferries</i> completamente elétricos, como o caso dos <i>ferries</i> da companhia Bastø Fosen, cortesia de <i>Infineon Technologies</i> . .....	17
Figura 2.7 - Esquema geral de uma PEMFC [27]. .....	18
Figura 2.8 - Esquema eletroquímico do processo numa célula de íão de lítio, cortesia de David Linden et al. ....	21
Figura 2.9 - À esquerda a evolução temporal da densidade de energia possível de armazenar em baterias íões de lítio. À direita a evolução temporal do mercado de procura de baterias íões de lítio, figuras da cortesia de Micah S. Ziegler et al [34]. .....	23
Figura 2.10 - Evolução dos preços por unidade de energia armazenada em baterias de íões de lítio, figura da cortesia de Micah S. Ziegler et al [34]. .....	23
Figura 2.11- Comparativo de diferentes tecnologias de armazenamento de energia por densidade de volume e massa, cortesia de San Martín et al. ....	24
Figura 2.12 - Esquemático de uma bateria VRB, cortesia de Xing Lu e Mark Dooner. ....	25
Figura 2.13 - Funções típicas de um BMS, adaptado de [44]. .....	27

Figura 2.14 - Topologias de BMS, adaptado de [45].....	27
Figura 2.15 - Representação do desequilíbrio das células e consequência em caso de equilíbrio ativo e passivo, cortesia de [45]. .....	29
Figura 2.16 - Ilustração clássica de controlo de tensão passivo (esquerda) e ativo (direita)...	30
Figura 2.17 - Diagrama típico de um veículo híbrido, cortesia de Hossain em [48]. .....	31
Figura 2.18 - Esquema clássico de um conversor redutor-elevador. ....	32
Figura 2.19 - Esquema clássico de SAE conectado indiretamente a uma rede trifásica. À esquerda o SAE encontra-se ligado a um conversor DC-DC. À direita um ondulado trifásico ligado a uma rede trifásica. ....	34
Figura 3.1 - Esquema elétrico simplificado do NRP <i>Almirante Gago Coutinho</i> .....	36
Figura 3.2- Gestão atual do comissionamento de grupos eletrogéneos. ....	38
Figura 3.3 - Consumo de combustível em função da carga dos grupos eletrogéneos. ....	39
Figura 3.4 – Intervalo de operação dos grupos eletrogéneos com SAE a realizar reserva energética. ....	40
Figura 3.5 - Gestão proposta de grupos eletrogéneos com recurso ao SAE em função da potência necessária no barramento principal.....	41
Figura 3.6 - Ilustração do atraso na corrente causado por cargas indutivas.....	42
Figura 3.7 – Diagrama de integração do conversor bidirecional e banco de baterias na rede do navio.....	43
Figura 3.8 - Tratamento de dados proposto .....	45
Figura 3.9 - À esquerda a relação entre potência aparente dos MEP e rpm e à direita a relação da velocidade do navio em função das rpm. ....	46
Figura 3.10 – Relação entre a velocidade do navio e a potência aparente.....	47
Figura 3.11 - Potência de propulsão (kVA), assumindo $FP = 0.8$ , em função da velocidade do navio (kt). ....	48
Figura 3.12 - Perfil de carga dos MEP e QEA em cenário de navegação corrida. ....	51
Figura 3.13 - Perfil de carga em cenário de operações oceanográficas 1. ....	52
Figura 3.14 - Perfil de carga em cenário de operações oceanográficas 2. ....	53
Figura 3.15 - Perfil de carga em cenário de manutenções de boias. ....	54
Figura 4.1 - À esquerda exemplo contentorizado do SAE e à direita as especificações gerais do SAE fabricado pela marca ESS [76]. ....	56

Figura 4.2 - Percurso do porto de Lisboa até à BNL, utilizando a ferramenta de medição de distâncias do <i>Google Maps</i> .	59
Figura 4.3 - Percurso do Porto de Setúbal até o Ponto de Apoio Naval de Troia, utilizando a ferramenta de medição de distâncias do <i>Google Maps</i> .	60
Figura 4.4 - Ciclo de 10 segundos constituídos por duas ordens bruscas nos propulsores.	61
Figura 4.5 – SoC (%) do SAE em função do tempo (s) em manobras de atracação, repetindo o ciclo de 10 segundos durante 10 minutos.	62
Figura 4.6 – Cenário de carregamento do SAE.	63
Figura 5.1 – Visão geral do modelo.	66
Figura 5.2 - Painel de controlo interativo.	68
Figura 5.3 - Exemplo do interior do subsistema do grupo eletrogéneo nº2.	71
Figura 5.4- Subsistema Instrumentação.	72
Figura 5.5 - Mapa de eficiência da conversão energética de um gerador síncrono utilizando uma aproximação linear durante testes. Cortesia de H. Kifune et al em [59].	73
Figura 5.6 - Interior do subsistema Grupo de baterias de iões de lítio.	74
Figura 5.7 - Fluxograma geral do algoritmo de comando e controlo do SAE.	75
Figura 5.8 – Subsistema <i>P Control</i> .	76
Figura 5.9- Condições para SAE fornecer energia e interior do subsistema sem restrições.	76
Figura 5.10- Diagrama do controlo proposto no modo híbrido.	77
Figura 5.11 - Parâmetros do controlador PID.	77
Figura 5.12 - Construção do ângulo da componente reativa da corrente que o SAE irá fornecer à rede para compensar o FP.	78
Figura 5.13 – Diagrama da construção dos sinais de referência para o SAE.	79
Figura 5.14- Interior do subsistema SAE.	80
Figura 5.15 - Interior do subsistema <i>Battery Dynamics</i> .	81
Figura 5.16 - Subsistema dos MEP.	82
Figura 5.17 - Carga auxiliar do navio.	83

Figura 6.1 - À esquerda o balanço das potências ativas e reativas (PQ) em modo <i>Only Diesel</i> e à direita no modo <i>Hybrid</i> . .....	86
Figura 6.2 - Comparação dos dados de saída entre os modos de funcionamento.....	87
Figura 6.3 - Balanço de potências em modo <i>Only Diesel</i> e modo <i>Hybrid</i> .....	88
Figura 6.4 – Comparação dos dados de saída entre os dois modos de funcionamento. ....	89
Figura 6.5 - Balanço de potências em modo <i>Only Diesel</i> e modo <i>Hybrid</i> .....	90
Figura 6.6 – Comparação dos dados de saída entre os dois modos de funcionamento. ....	91
Figura 6.7 - Balanço de potências em modo <i>Only Diesel</i> e modo <i>Hybrid</i> .....	92
Figura 6.8 - Comparação dos dados de saída entre os dois modos de funcionamento. ....	93

## Capítulo 1

### Introdução

#### 1.1 – Enquadramento

Atualmente assistimos a uma sociedade progressivamente mais tecnológica e global. Os avanços tecnológicos, após a massificação da industrialização, proporcionaram à população o potencial de ter uma melhor qualidade e mais longa esperança de vida. Conseqüentemente, o aumento da população no nosso planeta traduz-se numa maior demanda de energia e matéria-prima, para sustentar o estilo de vida contemporâneo cada vez mais consumista. Estes fatores causam uma evolução temporal do consumo energético crescente, conforme pode ser descrito na figura 1.1.

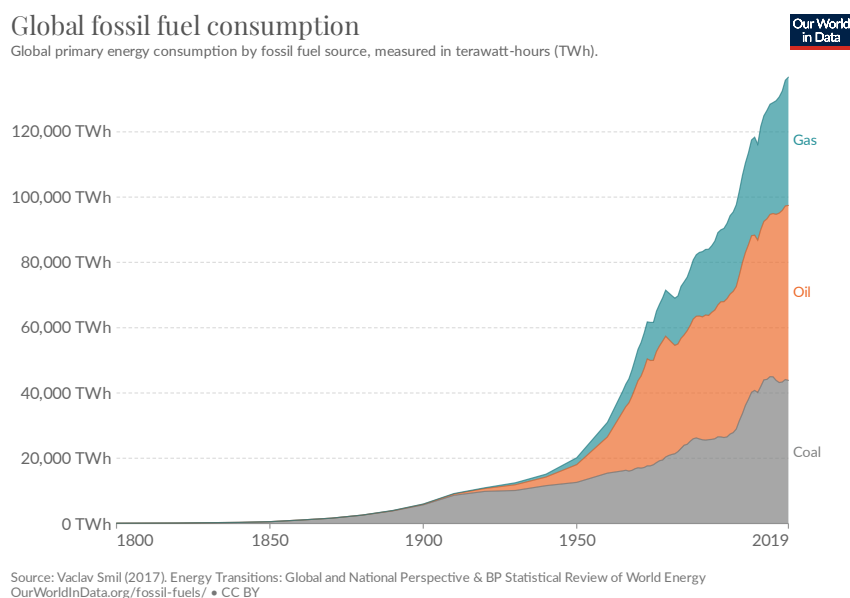


Figura 1.1 - Evolução temporal do consumo de combustíveis fósseis na última década [1].

Inevitavelmente, o incremento da industrialização trouxe consigo problemas de sustentabilidade ambiental, quer na vertente de esgotamento de recursos quer na área de emissões de gases de efeito de estufa (GEE) (demonstrado na figura 1.2). É estimado que o pico de emissões de GEE em valor absoluto ainda não tenha sido atingido. Mesmo existindo um decréscimo nos anos 2020 e 2021, esta diminuição deveu-se exclusivamente às restrições de confinamento e circulação impostas durante a pandemia causada pela COVID-19.

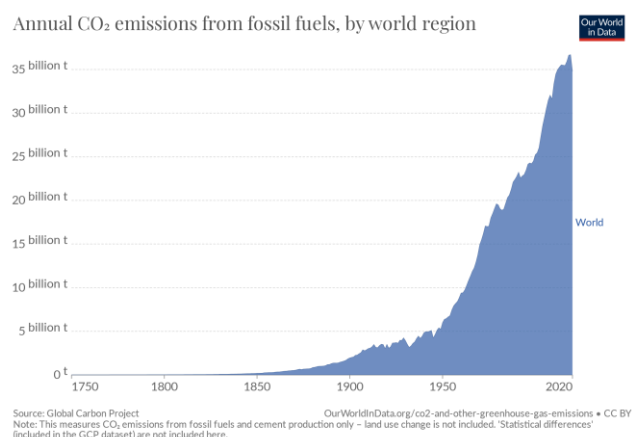


Figura 1.2 - Evolução temporal das emissões de  $CO_2$  de origem fóssil nos últimos 250 anos [1].

Segundo estimativas preliminares realizadas pela multi-organização *United in Science*, as emissões atuais na indústria da energia e setores domésticos, já atingiram níveis semelhantes ou superiores às registadas em 2019 [1].

### 1.1.1 – Acordo de Paris

Segundo relatórios históricos de produção de energia, desenvolvidos pela empresa BP [2], a Europa tem vindo a diminuir a sua dependência dos combustíveis fósseis para produção de energia, nas últimas duas décadas. Em 2007, cerca de 53% da energia elétrica produzida na Europa tinha como fonte combustíveis fósseis, enquanto em 2020 assistiu-se a uma diminuição para 38%, conforme é possível visualizar na figura 1.3.

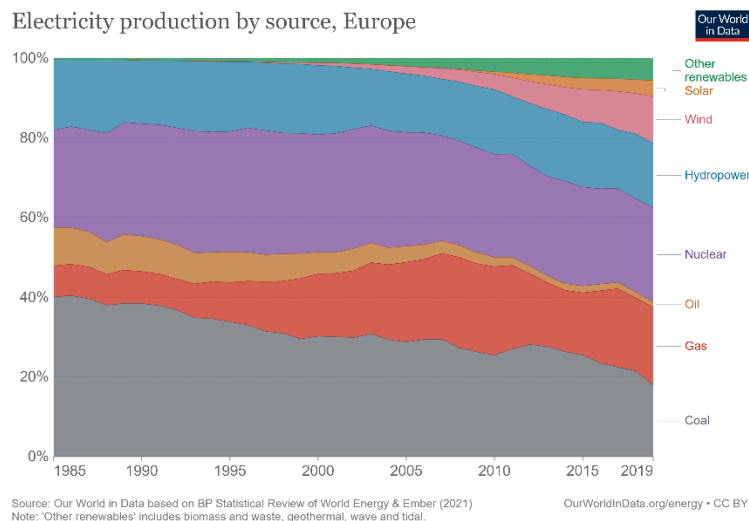


Figura 1.3 - Evolução temporal da distribuição energética para produção de eletricidade na União Europeia (UE) [1].

Este esforço coletivo, internacional e intercontinental, tem-se vindo a edificar devido ao Acordo de Paris [3] e com o objetivo de travar o aquecimento global. Estabelecendo como meta final o alcance da neutralidade carbónica em 2050 e uma redução mínima de 55% de emissões de GEE, em 2030 comparativamente aos níveis de 1990.

### 1.1.2 – Setor do transporte marítimo

Apesar dos esforços e incentivos financeiros em prol do desenvolvimento de tecnologia sustentável, um dos maiores responsáveis pela emissão de GEE é o setor dos transportes [4] devido à sua dependência de motores de combustão interna (MCI). Adicionalmente, este é um setor cuja descarbonização apresenta maiores desafios. Apesar da existência de soluções, estas irão necessitar de desenvolvimento ao nível das infraestruturas e ascensão na oferta, nomeadamente mais estações de combustível de hidrogénio e mais estações de carregamento de baterias. Dois subsectores particularmente complicados de debater são o setor marítimo e da aviação de longo curso, pois apesar dos novos desenvolvimentos tecnológicos, ainda não existe um rumo quanto à tecnologia a adotar para os transportes de longo curso.

A atual estratégia da Organização Marítima Internacional (IMO) [5] para descarbonizar o setor prevê uma meta de redução de 40% até 2030 e de 70% até 2050 (comparativamente a 2008), ficando aquém dos objetivos da UE. No entanto, apesar de não ser possível eliminar

completamente as emissões de GEE neste setor, é importante delinear e adotar um passo intermédio que caminhe na direção das metas europeias, tornando os navios energeticamente mais eficientes, fazendo uso de tecnologias já comprovadas na atualidade como é o caso das técnicas de hibridação e eletrificação de navios.

### **1.2 – Motivação**

Durante o meu percurso profissional tive a oportunidade de exercer a função de Chefe de Serviço de Eletrotécnica a bordo de um dos navios hidrográficos da Marinha Portuguesa, o Navio da República Portuguesa (NRP) *Almirante Gago Coutinho*.

Da experiência obtida, saliento que a gestão de grupos geradores era aparentemente pouco eficiente ao nível energético. Isto deve-se, garantidamente, ao normativo existente de gestão energética que tem como objetivo assegurar a capacidade de sobrevivência da plataforma. Este normativo prevê uma reserva de energia de valor igual à produzida por um grupo gerador, em qualquer momento, neste caso o equivalente a uma potência de 650 kVA. De um modo geral, o número de geradores em funcionamento simultâneo é sempre superior ao estritamente necessário, fazendo com que os grupos funcionem maioritariamente em regimes de baixa carga. Como consequência, os grupos passam a funcionar em regimes cuja eficiência é abaixo da ótima.

A hipótese proposta nesta tese será provar que é possível obter uma maior eficiência energética, removendo a necessidade de um grupo gerador suplementar, substituindo este por um sistema de armazenamento de energia (SAE) que garanta a reserva energética prevista no normativo.

### **1.3 – Caso de estudo**

O navio escolhido para realizar o caso de estudo é o NRP *Almirante Gago Coutinho* (ver figura 1.4). Este foi, inicialmente, concebido para deteção submarina ao serviço da Marinha dos Estados Unidos da América (EUA), mais tarde foi convertido para um navio hidrográfico e adicionado ao efetivo da Marinha Portuguesa.

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

---

Este navio é empregue em missões de carácter científico, operações de levantamentos hidrográficos para o projeto de extensão da plataforma continental e campanhas oceanográficas para o estudo do ambiente marinho [6].



Figura 1.4 - NRP *Almirante Gago Coutinho*.

Com acesso aos dados, gentilmente cedidos pela Marinha Portuguesa, de gestão elétrica da plataforma e cruzando os mesmos com dados de navegação, são facilmente distinguíveis os diversos cenários em que o navio é empregue, assim como a demanda de carga elétrica para cada um destes. Exemplos destes cenários são: percurso de porto, operações oceanográficas, manobras de atracação e navegação corrida.

Apesar deste navio estar a caminhar para a reta final da sua vida útil, a configuração da propulsão e geração de energia, desta tipologia de plataformas, têm-se vindo a manter inalterada até à atualidade. Portanto, o estudo aqui efetuado mantém o potencial para implementações futuras.

## **1.4 – Estrutura da tese**

Este trabalho está estruturado por 7 capítulos.

O primeiro capítulo procura, de uma forma sucinta, introduzir a temática e a sua relevância para o contexto contemporâneo. Aborda ainda a motivação do autor, a estrutura do documento e definição de objetivos.

No segundo capítulo é realizada uma revisão da literatura das tecnologias relevantes para a realização desta dissertação, focando a pesquisa na aplicabilidade ao setor marítimo.

O terceiro capítulo caracteriza o caso de estudo. São descritos os grupos geradores de energia, a tipologia de propulsão elétrica. Neste capítulo são trabalhados os dados que irão alimentar os modelos numéricos, correlacionando os dados de consumo de energia com os dados de navegação com o objetivo de traçar os perfis de utilização de energia por cada cenário em que o navio é tipicamente empenhado.

O quarto capítulo revolve no dimensionamento do SAE, no qual será necessário analisar os requisitos da reserva energética. São desenvolvidos tópicos como a tipologia e requisitos do SAE, autonomia em função da velocidade e cenários de para carregamento.

O quinto capítulo irá agregar o conhecimento obtido e vertê-lo num modelo numérico desenvolvido em software MATLAB® Simulink®. Este modelo possibilitará simular a instalação elétrica e propulsão do navio tal como ela existe na atualidade assim como compará-la com a alternativa híbrida proposta nesta tese. As simulações serão alimentadas com dados reais trabalhados no capítulo 4.

No sexto capítulo serão expostos os resultados da simulação numérica e analisada a dinâmica da instalação electroprodutora nos diversos cenários em que o navio é empregue. Serão comparadas as performances no modo convencional e no modo híbrido por cada cenário simulado, assim como serão abordados tópicos como os benefícios mensuráveis e não mensuráveis.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, adicionalmente é também realizada uma discussão sobre possíveis futuros desenvolvimentos nesta temática.

### **1.5 – Objetivos**

Os objetivos para este estudo baseiam-se na hipótese que é possível melhorar a eficiência energética do navio em análise, adicionando, à atual instalação electroprodutora, um SAE em modo híbrido paralelo.

Deste modo, os objetivos propostos nesta dissertação são:

- Dimensionar um SAE que permita uma utilização do navio de forma mais eficiente e menos poluente;
- Desenvolver uma simulação numérica em *software Matlab Simulink*, que permita descrever o navio convencional e compará-lo com a solução proposta nesta dissertação;
- Utilizar dados de operação reais do navio, por forma a criar perfis de utilização para cada cenário em que o navio é empregue;
- Estudar a eficiência energética, utilizando os perfis reais de utilização do navio recorrendo a modelos de simulação numérica;
- Clarificar e quantificar as vantagens de adotar este tipo de tecnologia, em navios já existentes, preparando-os mais eficientemente para a sua restante vida útil.



## Capítulo 2

# Estado da arte da eletrificação do setor dos transportes

## 2.1 – Introdução histórica

### 2.1.1 – Motor de combustão interna e industrialização

A invenção do motor de combustão interna (MCI) deve-se ao esforço de inúmeras personalidades, e remonta a estudos teóricos do século XVII por Huygens [7] com o seu motor de combustão interna a pólvora, que mais tarde levaria ao desenvolvimento revolucionário de Nicolaus Otto e Eugene Langen, no final do século XIX, com a produção do primeiro MCI a quatro tempos [8].

A partir de então, esforços humanos começaram a ser substituídos por máquinas e viagens de milhares de quilómetros tornaram-se realidade. Inevitavelmente, surgiu uma maior procura de combustíveis de origem fóssil (carvão, gasolina e gás natural) como fonte de energia para os MCI, ao longo do século XX, que passou a ser um recurso de relativamente fácil acesso, comercialização e barato.

Contudo, a exploração e massificação da combustão de combustíveis fósseis tem consequências negativas, concretamente, a queima destes é a maior fonte de emissão de GEE que fomenta as alterações climáticas a que temos vindo a assistir. Como é descrito num relatório interagências dos EUA: “Várias linhas de evidência demonstram que atividades humanas, especialmente a emissão de GEE, são os responsáveis primários para as observáveis mudanças climáticas na era industrial, concretamente nas últimas seis décadas” [9].

### **2.1.2 – Acordo de Paris**

A necessidade de mudança é clara e inquestionável, a trajetória da subida da temperatura média global caminha para patamares insustentáveis com consequências sem precedentes. O reconhecimento global deste problema materializou-se, mais recentemente, no Acordo de Paris em 2015. Esta convenção reuniu esforços de grande parte das nações com o objetivo de limitar a subida da temperatura média global fixando-a abaixo dos 2° Celsius até 2100 (com potencial de limitar a subida em 1.5° C) [10].

Por forma a concretizar as metas impostas no Acordo de Paris, a UE tem vindo a delinear um plano ambicioso de reduzir as emissões de GEE em 50% até 2030 e ser o primeiro continente a atingir a neutralidade carbónica em 2050. Para alcançar este objetivo existem metas específicas para cada setor, que contribuem com emissões de CO<sub>2</sub>. O setor dos transportes não é exceção, apesar da revolução no setor automóvel com a introdução da eletrificação, hibridação e aumento da disponibilidade do hidrogénio para ser utilizado como combustível, ainda não é consensual qual a tecnologia a aplicar no setor marítimo.

Apesar das metas propostas para o setor marítimo serem menos ambiciosas que as metas globais, é importante procurar maximizar a eficiência dos navios, fazendo com que este setor dê o seu contributo para um futuro mais sustentável. É aceite, de forma consensual, que o tempo médio de vida de uma plataforma naval ronda os 30 a 50 anos, o que é bastante superior, comparativamente, ao setor automóvel. Este ponto é fulcral para a relevância da eficiência energética dos navios durante a sua construção, assim como a adoção de estratégias para melhorar a eficiência em navios já existentes.

## **2.2 – Eletrificação nos transportes**

A eletrificação de veículos tem-se vindo a cimentar como a tecnologia que irá potencializar a descarbonização o setor dos transportes [11]. Desenvolvimentos ao nível da capacidade de armazenamento de energia (aumento da densidade energética armazenada), construção de motores elétricos cada vez mais eficientes e tecnologias de carregamento rápido têm vindo a equalizar as capacidades dos veículos elétricos comparativamente aos veículos tradicionais.

No entanto, a transformação de navios movidos a MCI para uma alternativa livre de emissões, envolve várias tecnologias das quais é possível destacar:

- **Propulsão diesel-elétrico:** No qual o gerador diesel produz eletricidade para movimentar os motores elétricos da propulsão (esta é a tipologia do navio no caso de estudo, desenvolvida em detalhe no capítulo 3);
- **Propulsão Híbrida:** Nesta tipologia existem baterias em complemento ao MCI. Tipicamente as baterias são utilizadas para providenciar energia quando os MCI se encontram em regimes menos eficientes. Porém, noutras configurações, as baterias podem armazenar energia suficiente para permitir que o navio navegue estritamente a energia elétrica;
- **Propulsão elétrica:** Neste caso, toda a energia provém de um conjunto de baterias, descartando a necessidade de MCI;
- **Propulsão a célula de combustível:** Consiste num dispositivo que converte energia contida num combustível eletroquímico em energia elétrica [12];

### 2.2.1 – Transmissão diesel-elétrico

A tipologia de diesel-elétrico tem vindo a ser utilizada desde o início do século XX, no entanto, esta tecnologia permaneceu confinada a utilizações altamente especializadas no setor marítimo [13].

O arranjo geral de um sistema de propulsão diesel-elétrico, é descrito na figura 2.1 para uma arquitetura de 2 veios propulsores [14].

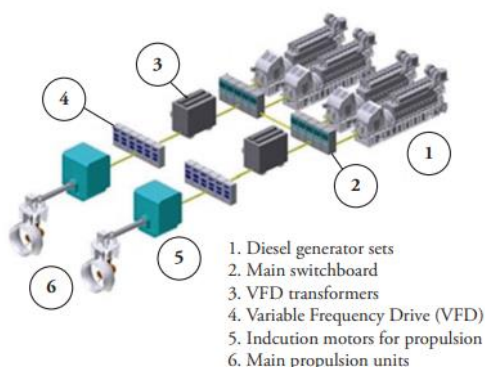


Figura 2.1 - Arranjo geral de um sistema propulsor diesel elétrico de 2 veios propulsores (imagem da cortesia de Cristian Vásquez em [14]).

Nesta configuração, os geradores diesel produzem energia elétrica que posteriormente é distribuída aos motores elétricos que fornecem binário aos veios de propulsão.

Esta tipologia ocupa menos espaço e é mais leve que a tecnologia equivalente a MCI, e simultaneamente permite uma melhor interface com o motor elétrico propulsor, na medida em que não necessita de uma embraiagem ou caixa redutora.

Pode também considerar-se que as aplicações com maior sucesso desta tipologia de propulsão são aquelas que necessitam de grande flexibilidade e bom rendimento em diferentes cenários, como é o caso de operações oceanográficas (tópico desenvolvido na secção 3.7) e aplicações cuja carga elétrica auxiliar seja de dimensão equiparável à da propulsão, como por exemplo navios cruzeiros.

### **2.2.2 – Transmissão Híbrida**

A definição de transmissão híbrida proposta pela Comissão Internacional Eletrotécnica (IEC) é descrita como um veículo que usa, para propulsão, energia de duas ou mais fontes de armazenamento ou conversores. Pelo menos uma fonte ou conversor deve estar a bordo do veículo (*on-board*).

Apesar da definição acima descrita ser bastante abrangente, esta secção irá focar nas tipologias que utilizam MCI e motores elétricos. É geralmente aceite que existem duas tipologias de veículos híbridos, nomeadamente em série e paralelo. No entanto, os desenvolvimentos na indústria automóvel, neste segmento, têm vindo a redefinir a classificação de veículos híbridos de tal forma que duas categorias são insuficientes [15].

Aos dias de hoje é consensual que os veículos híbridos podem ser classificados em 4 categorias, conforme diagrama da figura 2.2:

- Híbrido série;
- Híbrido paralelo;
- Híbrido serie-paralelo;
- Híbrido complexo.

## Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

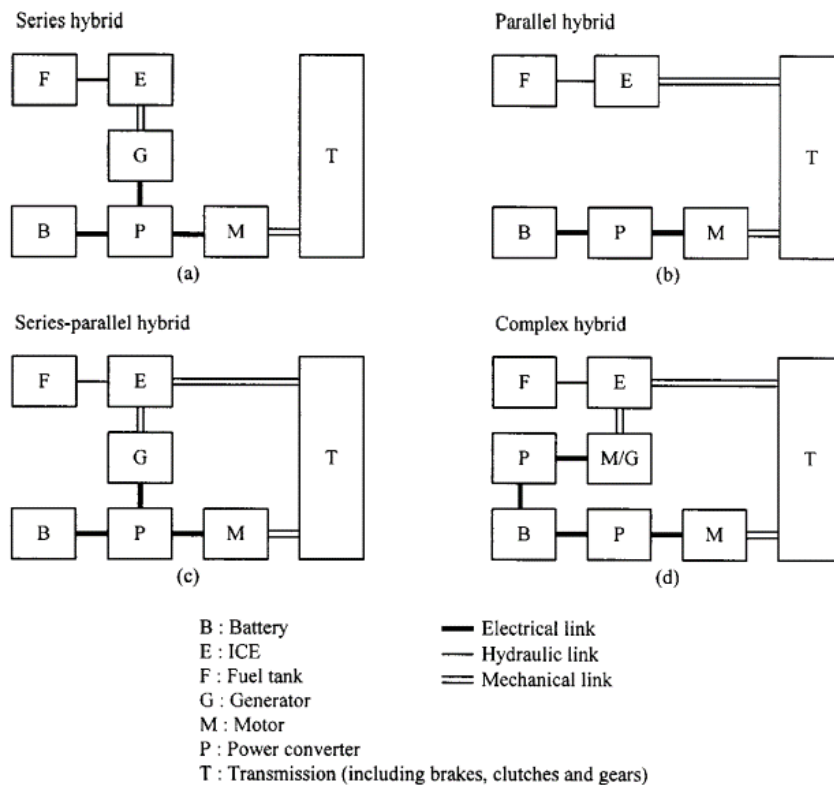


Figura 2.2 - Classificação de veículos híbridos. Imagem cortesia de Fellow Chan [16].

De um modo geral, cada tipologia de veículo híbrido oferece vantagens e desvantagens em relação às restantes, sendo necessário adequar a tipologia de transmissão consoante a aplicação pretendida. Para isto acontecer, é necessário delinear o objetivo para o qual a transmissão irá servir, que habitualmente enquadra nas seguintes estratégias:

- Maximizar economia de combustível;
- Minimizar emissões GEE;
- Minimizar os custos do sistema;
- Maximizar o desempenho.

Por forma a atingir os objetivos anteriormente expostos, é necessário definir uma estratégia sobre onde atuar no veículo [17], assegurando que a energia no veículo deve ser gerida de tal forma que:

- 1) Os *inputs* do condutor devem ser satisfeitos constantemente (Mutasin define que a “sensação” de conduzir um veículo híbrido não deve ser diferente do que um veículo convencional [18]);
- 2) A bateria encontra-se suficientemente carregada em todos os momentos;
- 3) A eficiência geral do sistema dos quatro componentes básicos (MCI, motor elétrico, bateria e transmissão) é otimizada.

Nesta dissertação, conforme é explorado no capítulo 3, o objetivo será maximizar a economia de combustível do sistema electroprodutor de um navio de investigação científica de tipologia diesel-elétrico. Por forma a maximizar a economia de combustível, recorreu-se à implementação de um banco de baterias de lítio em funcionamento híbrido paralelo com os grupos electroprodutores, por forma aumentar a eficiência.

### **2.2.2.1 – Mapa de eficiência de motor de combustão interna**

O desempenho de um MCI pode ser demonstrado graficamente, sendo o binário desenhado no eixo das ordenadas e a velocidade angular do motor no eixo das abcissas. Este gráfico tem o nome de “mapa do motor” [19]. O desempenho do motor é posteriormente demonstrado sobrepondo no mapa de contornos à constante BSFC (*brake specific fuel consumption*). BSFC é o consumo de combustível pela potência desenvolvida pelo MCI e tem como unidade g/kWh.

Um exemplo de um mapa BSFC para um motor a gasolina de quatro tempos é dado pela figura 2.3 [20], onde é possível verificar que existem regiões do gráfico com maior eficiência que outras. Com o mapa BSFC, é possível verificar as combinações entre potência e velocidade do motor em que o MCI é mais eficiente (quanto mais baixo o valor do contorno melhor). Em suma, queremos maximizar o tempo de operação dos MCI nos regimes energeticamente mais eficientes, ou seja, com menor consumo específico, identificado no mapa BSFC.

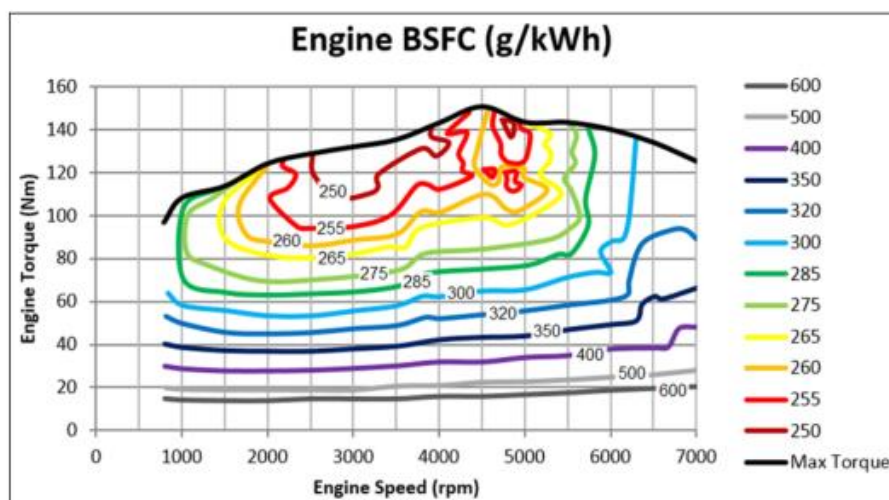


Figura 2.3 - Mapa BSFC de motor gasolina de 4 tempos, cortesia de Mahdi Mohammadpour and Homer Rahnejat em [20].

De notar que no caso de estudo, como o modo de funcionamento dos grupos electroprodutores é fixo numa velocidade (tópico desenvolvido no capítulo 3.2.1). O mapa equivalente de BSFC deixa de ser efetuado em contornos pois apenas existe um valor de velocidade do MCI, como se pode verificar na figura 2.4.

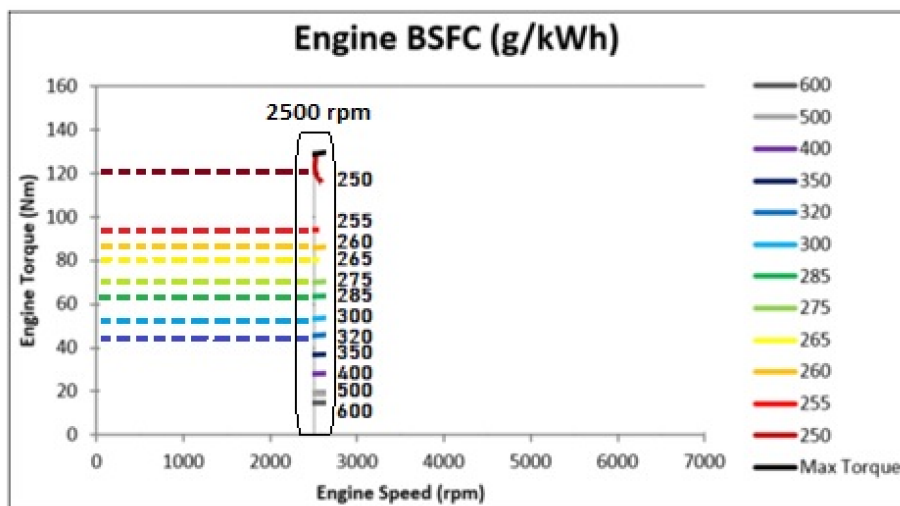


Figura 2.4 - Mapa BSFC expectável para um MCI cujo funcionamento é de velocidade constante (figura 2.3 adaptada).

### 2.2.3 – Transmissão elétrica

Os veículos de transmissão completamente elétrica, são aqueles que apenas utilizam energia elétrica armazenada em bancos de baterias<sup>1</sup> para mover motores elétricos que propulsionam o veículo, conforme é demonstrado na figura 2.5.

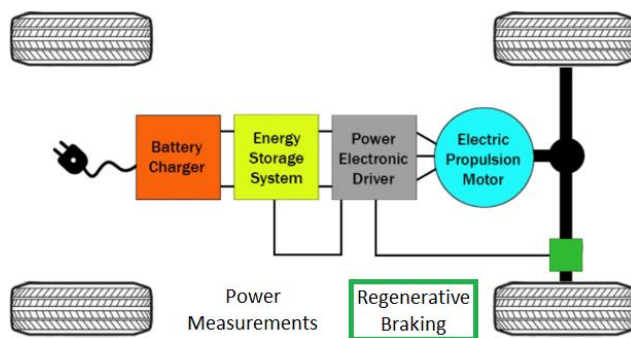


Figura 2.5 - Diagrama básico para um veículo puramente elétrico, imagem cortesia de Evannex [21].

Como toda a energia se encontra armazenada no banco de baterias, o alcance deste tipo de veículos está diretamente relacionado à capacidade do grupo de baterias. Atualmente é comum encontrar veículos elétricos (VE) com alcance a rondar as centenas de quilómetros, dependendo da sua aplicação, estilo de condução, temperatura, estado da bateria e condições da estrada [22].

Na atualidade, os veículos de transmissão completamente elétrica têm vindo a ganhar popularidade, devido a inúmeras vantagens em relação aos veículos de MCI. É geralmente aceite que a migração de veículos de MCI para VE contribui significativamente para a redução de GEE, poupança em gastos de combustível e manutenção, ganho em simplicidade da plataforma (menos equipamentos), mais silencioso e, potencialmente, melhor desempenho em percursos urbanos, em comparação com um veículo tradicional.

Enquanto na indústria automóvel a sua aplicação é uma realidade, especialmente para aplicação urbana e suburbana, no setor marítimo a sua aplicação ainda se encontra pouco desenvolvida.

---

<sup>1</sup> Nesta seção será exclusivamente explorado o armazenamento de energia em bancos de baterias de lítio.

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

Encontrando-se reservada a aplicações altamente especializadas como é o caso dos *ferries* noruegueses, construídos pelo estaleiro Fjellstrand [23], que efetuam um trajeto de seis quilómetros trinta e quatro vezes por dia. Este cenário possibilita o carregamento das baterias, sempre que o *ferry* atraca durante a entrada e saída de passageiros, conforme ilustrado na figura 2.6.

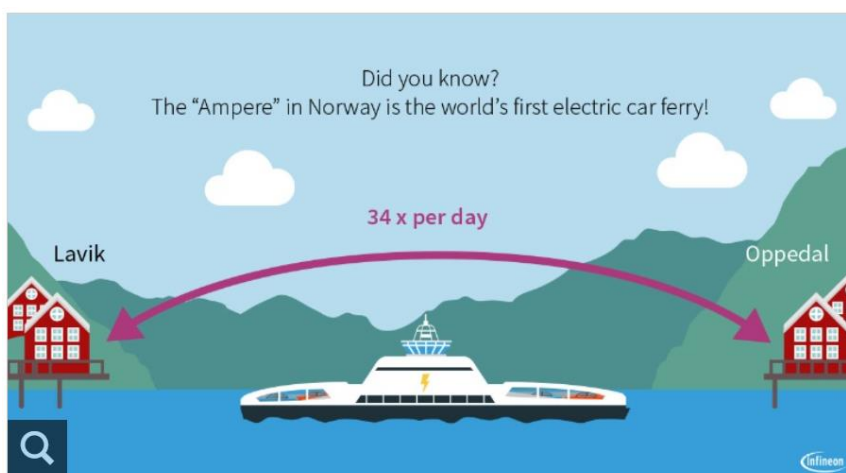


Figura 2.6 – Imagem ilustrativa da aplicação de *ferries* completamente elétricos, como o caso dos *ferries* da companhia Bastø Fosen, cortesia de Infineon Technologies.

Segundo relatórios realizados pela empresa Infineon Technologies as baterias deste navio, que equivalem, em capacidade, a 1600 baterias de automóveis, permitem reduzir o consumo de combustível diesel em milhões de litros, reduzir os custos de operação em 80% e reduzir as emissões de GEE em 95% em comparação com *ferries* convencionais. A companhia Bastø Fosen, prevê ainda aumentar o número de *ferries* completamente elétricos durante 2022, com a adição da classe de navios *Bastø Electric*, com comprimento de 139.2 metros, capacidade de transporte de 600 passageiros e 200 carros e SAE com capacidade de 4.3 MWh [24].

#### 2.2.4 – Veículo elétrico com célula de combustível (VECC ou FCEV)

Uma tecnologia que atualmente tem vindo a ser alvo de investimento significativo é o uso de hidrogénio como combustível através de células de combustível [25]. Também denominado por “hidrogénio verde”, produzido através de eletrólise da água e potencialmente livre de emissões

de carbono (se obtido através de energias renováveis), poderá vir a ter o potencial para inovar o setor do transporte marítimo.

Ao contrário das baterias convencionais, a célula de combustível pode ser continuamente alimentada com hidrogénio, de forma que a energia elétrica produzida possa ser mantida indefinidamente [26]. Deste modo, a célula de combustível converte hidrogénio, ou combustíveis à base de hidrogénio, diretamente em eletricidade e calor através reações eletroquímicas do hidrogénio e oxigénio.

Existem inúmeras tipologias de células de combustível, nesta seção é abordada a célula de combustível com membrana de troca protónica (PEMFC), que é a mais popular, e potencialmente com maior utilidade em aplicação no setor dos transportes. O esquema geral de uma PEMFC é o habitualmente descrito conforme a figura 2.7.

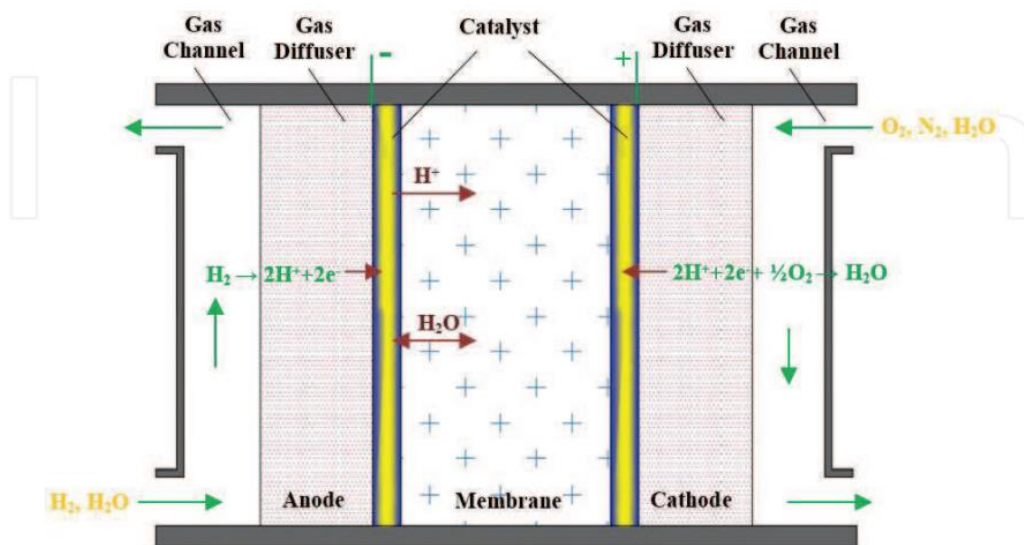


Figura 2.7 - Esquema geral de uma PEMFC [27].

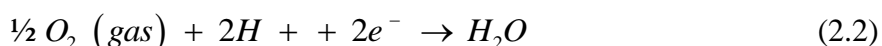
O seu funcionamento baseia-se na inserção de hidrogénio no canal do ânodo, que irá originar uma interação com o catalisador do ânodo, resultando na divisão do hidrogénio molecular em 2 mols de prótons e 2 eletrões, conforme descrito pela Eq. 2.1:



---

Conforme o próprio nome indica, a membrana de intercambio de prótons permite a passagem de prótons, mas não de eletrões. Os eletrões terão de efetuar a passagem do ânodo para o cátodo via circuito externo, criando uma corrente elétrica. [27]

Do lado do cátodo, os prótons reagem com os eletrões e ainda com o oxigénio presente no canal do cátodo, originando água. Esta reação pode ser dada pela Eq. 2.2:



Resumindo, a reação que ocorre na PEMFC pode ser escrita conforme a Eq. 2.3:



em que a emissão é água pura, podendo classificar a PEMFC como um dispositivo de conversão de energia limpa [28].

Durante décadas, o hidrogénio líquido tem vindo a ser utilizado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), como combustível para foguetões de inúmeros vaivéns espaciais tais como a *Centaur* e *Apollo* [29]. No entanto, à semelhança da situação dos veículos puramente elétricos, as infraestruturas e a disponibilidade de hidrogénio ainda são escassas e apresentam-se como barreiras para a disseminação desta tecnologia. Adicionalmente, o armazenamento de hidrogénio no estado gasoso levanta questões ao nível da segurança, devido à necessidade de reservatórios de ar comprimido a pressões na ordem das centenas de bar [30]. Alternativamente, o hidrogénio poderia ser armazenado na sua forma líquida, no entanto devido ao seu ponto de ebulição de  $-252.8$  °C à pressão de uma atmosfera, este método torna-se impraticável para a maioria das aplicações comerciais.

Outras formas de armazenamento de hidrogénio, encontram-se em investigação com potencial para aplicação no setor dos transportes, como é o caso dos métodos de absorção e adsorção por sólidos [31].

Apesar do potencial da tecnologia em aplicação automóvel, o mesmo ainda apresenta reservas quanto ao emprego no setor marítimo e aviação. Estes setores, tipicamente associados a longos trajetos, não detêm a possibilidade de restaurar as reservas de hidrogénio durante a viagem. Adicionalmente, no caso de navios já comissionados, existe a necessidade de realizar alterações consideráveis a nível elétrico e estrutural, por forma a alojar os novos reservatórios de hidrogénio e células de combustível, tornando-se impraticável e com grandes investimentos.

Em suma, a geração de energia através de células de combustível parece ter o potencial para ser uma das soluções num futuro próximo para impulsionar o setor dos transportes. No entanto, o seu custo ainda elevado e a complexidade de implementação tornam-no difícil de justificar e implementar em navios já existentes, no entanto, se a disponibilidade do hidrogénio aumentar e as infraestruturas de distribuição e armazenamento acompanharem esta evolução, esta tecnologia poderá a vir a ser uma opção viável em navios construídos de raiz.

## 2.3 – Sistemas de armazenamento de energia

A hipótese testada nesta dissertação, é a de que é possível melhorar a eficiência energética de um navio já existente, recorrendo a técnicas de hibridação, nomeadamente adicionando um SAE paralelamente ao grupo electroprodutor.

A escolha da tipologia do SAE irá depender dos requisitos delineados ao nível operacional do navio, entre os quais:

- Autonomia do navio em modo elétrico;
- Tempo de resposta para fornecimento de energia;
- Potência disponível na situação de navio atracado e a navegar;
- Constrangimentos de volume e peso para alocar o SAE;
- Custo por unidade de capacidade de armazenamento de energia: Euro/MWh.

Nas próximas secções, serão abordadas as tipologias de SAE que poderão ser aplicáveis a um navio.

### 2.3.1 – Baterias de iões de lítio (*Li-ion*)

As baterias de iões de lítio podem ser descritas como um conjunto de células que utilizam compostos de lítio intercalados com materiais positivos e negativos. À medida que a bateria realiza ciclos de carga e descarga, os iões de lítio ( $\text{Li}^+$ ) deslocam-se para os eléctrodos negativos e positivos respetivamente, através do eletrólito e separador [32], enquanto os eletrões circulam por um circuito externo entre os eléctrodos. Geralmente o eléctrodo positivo consiste num óxido

## Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

metálico (como o óxido de lítio cobalto,  $LiCoO_2$ ) numa estrutura por camadas ou em túnel, eletricamente ligado a um coletor de corrente. O eletrodo negativo, também conectado eletricamente a um coletor de corrente, consiste num eletrodo numa estrutura também por camadas, que servirá para alojar os íons de lítio e os eletrões quando a célula estiver carregada, conforme é possível visualizar na figura 2.8.

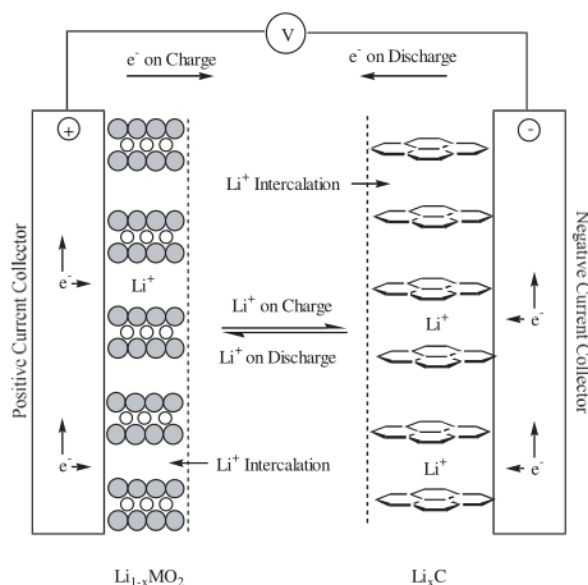


Figura 2.8 - Esquema eletroquímico do processo numa célula de íão de lítio, cortesia de David Linden et al.

Quando no circuito externo é conectada uma fonte de tensão, os eletrões são atraídos e removidos dos átomos de lítio do óxido metálico e percorrem o circuito externo até ao eletrodo negativo, visto não conseguirem atravessar o eletrólito. Quando os eletrões estão armazenados nas camadas de grafeno, irão atrair os íons positivos de lítio, que por sua vez irão fluir pelo eletrólito até ao espaço entre camadas de grafeno. Quando todos os íons de lítio se encontrarem armazenados nas camadas de grafeno, a célula encontra-se completamente carregada.

Por outro lado, quando a fonte de tensão é substituída por uma carga, os íons de lítio voltam à sua condição estável (ligados ao óxido metálico). Assim, os íons percorrem o eletrólito e os eletrões percorrem o circuito externo em direção ao eletrodo positivo, gerando uma corrente no circuito da carga, voltando a ficar ligados ao óxido metálico de forma estável.

As vantagens e desvantagens das baterias íons de lítio, são descritas sumariamente conforme a tabela 2.1 [33]:

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens das baterias iões de lítio.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<i>Células seladas (sem manutenção necessária)</i>	<i>Custos iniciais moderados</i>
<i>Longo ciclo de vida e baixa taxa de auto descarga</i>	<i>Degradação a altas temperaturas</i>
<i>Largo espectro de temperatura de operação</i>	<i>Necessidade de circuitos de proteção</i>
<i>Alta capacidade de carga e descarga de energia</i>	<i>Perda de capacidade quando sobrecarregado</i>
<i>Alta eficiência energética e densidade energética</i>	<i>Possíveis fugas térmicas quando sobrecarregado</i>
<i>Pouco efeito de memória e longa vida estrutural</i>	<i>Possíveis fugas térmicas quando esmagadas</i>

Relativamente a outros tipos de baterias, as baterias de iões de lítio destacam-se pela elevada densidade de energia gravimétrica (~150 Wh/kg) e densidade de energia volumétrica (~400Wh/L), tornando-as indicadas para aplicações onde o volume e peso são importantes.

Existem variações de tamanhos e formas desenvolvidos por diferentes fabricantes. Cada célula de bateria opera numa janela de tensão entre 2.5 a 4.2 V, no qual é possível interligar várias células em série e em paralelo por forma a atingir a tensão e energia necessárias.

O constante aperfeiçoamento deste tipo de baterias (aumento da densidade energética), aliado ao crescimento constante do mercado (ver figura 2.9), tiveram como consequência a queda do preço das baterias de iões de lítio, conforme indicado na figura 2.10 [34], atingindo o mínimo histórico, em 2020, de 100 USD/kWh [35].

Atualmente a aplicação deste tipo de baterias é realizada pela marca *Tesla*, quer no setor automóvel [36] quer para aplicação doméstica [37], que tem vindo a cimentar-se como a marca líder em veículos elétricos. No setor marítimo, o navio cruzeiro *MS Roald Amundsen*, utiliza baterias de iões de lítio na sua arquitetura híbrida, permitindo-o navegar em modo elétrico durante 30 minutos. Na Noruega, o *ferry Ampere*, desenvolvido pela empresa *Siemens* em conjunto com o estaleiro *Fjellstrand*, armazena o equivalente a 1600 baterias automóveis para realizar um percurso de 6 quilómetros 34 vezes por dia, carregando as baterias durante a entrada e saída de passageiros. A China foi o primeiro país a desenvolver um navio porta-contentores elétrico, necessitando de 1000 baterias de iões de lítio para perfazer 2.4 MWh de energia armazenada, tendo um alcance de 80km [23].

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

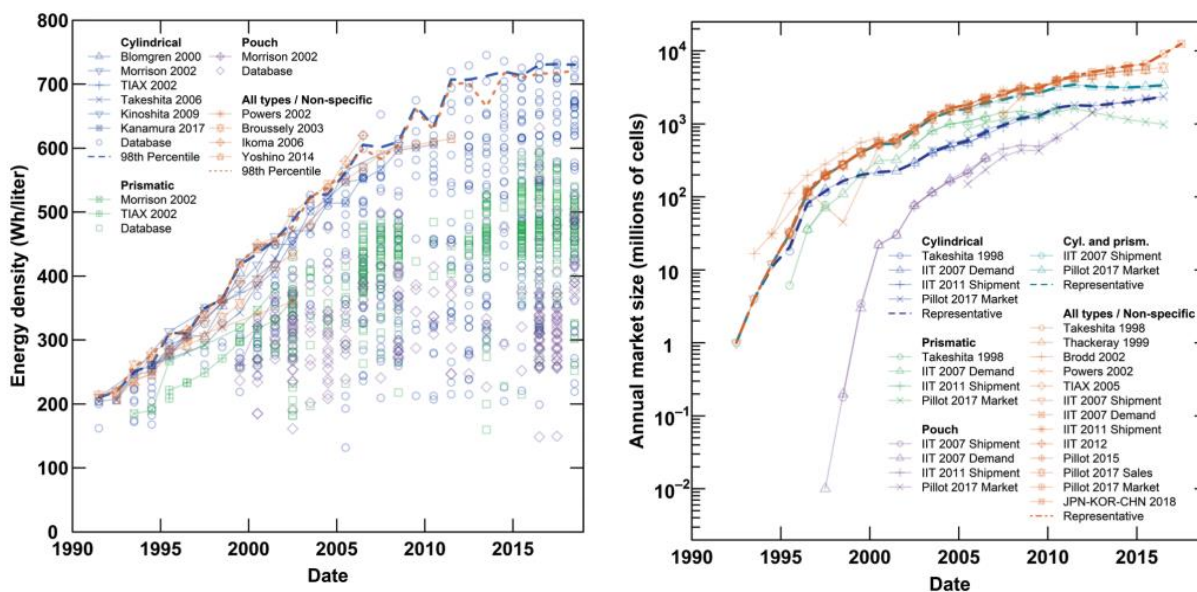


Figura 2.9 - À esquerda a evolução temporal da densidade de energia possível de armazenar em baterias íons de lítio. À direita a evolução temporal do mercado de procura de baterias íons de lítio, figuras da cortesia de Micah S. Ziegler et al [34].

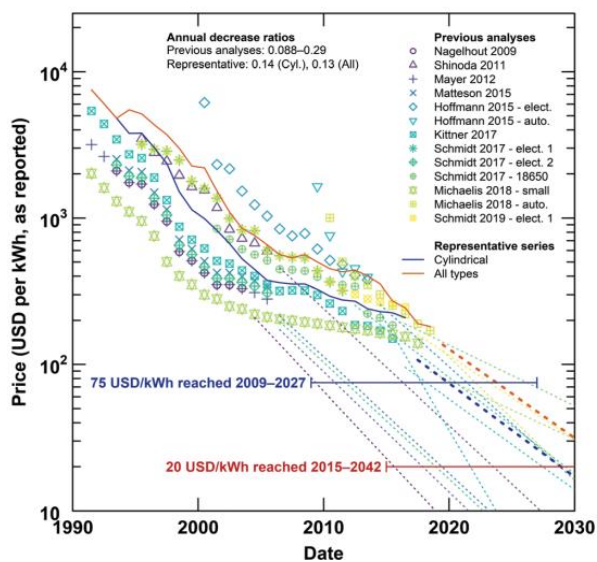


Figura 2.10 - Evolução dos preços por unidade de energia armazenada em baterias de íons de lítio, figura da cortesia de Micah S. Ziegler et al [34].

Uma das razões pela qual as baterias de íons de lítio têm vindo a ganhar popularidade no setor dos transportes é a disponibilidade de energia e potência máxima por densidade de volume e massa. A figura 2.11 mostra um comparativo de diferentes tecnologias de armazenamento,

baseado nas densidades de volume e massa, onde é possível verificar que as baterias de iões de lítio encontram-se na faixa do espectro onde é possível armazenar mais energia por unidade de volume e massa [38].

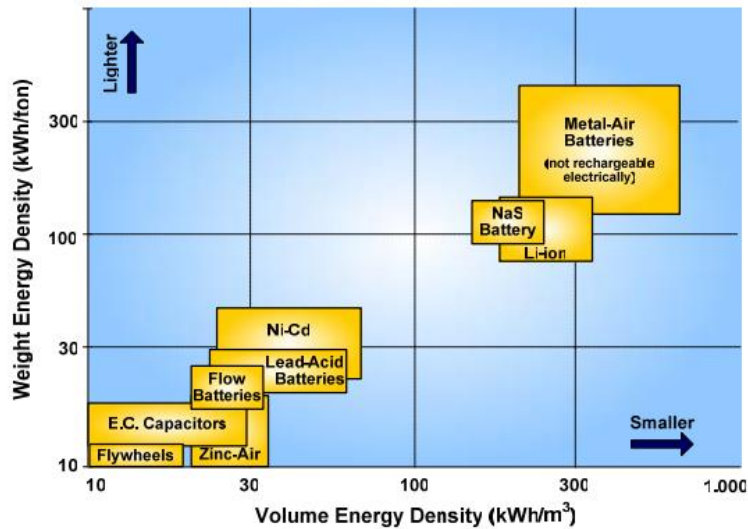


Figura 2.11- Comparativo de diferentes tecnologias de armazenamento de energia por densidade de volume e massa, cortesia de San Martín et al.

Como desvantagem referida na tabela 2.1, os bancos de baterias de iões de lítio, necessitam de circuitos externos de proteção, também conhecidos por *Battery Management System (BMS)*. Para além de proteger contra sobrecargas e sobredescargas, que impactam negativamente o desempenho da bateria, irá assegurar que as diversas células constituintes são carregadas e descarregadas ao mesmo ritmo. Este tópico é abordado em maior detalhe na subsecção 2.4.

### 2.3.2 – Flow Batteries

As baterias de fluxo mais comuns, e cuja tecnologia encontra-se mais consolidada, são as *Vanadium Redox Battery (VRB)*, que consistem num fluxo de eletrólitos armazenados em reservatórios externos. O princípio de funcionamento baseia-se na transferência de eletrões entre formas iónicas do vanádio [39], conceito semelhante às baterias de iões de lítio e células de combustível.

Durante a fase de carregamento, no elétrodo negativo ocorre a reação de oxidação dos iões de vanádio:

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio



e no elétrodo positivo ocorre a reação de redução:



Durante a descarga ocorrem os processos inversos.

À semelhança das baterias de íons de lítio, existe uma membrana apenas permeável a íons selecionados para efetuar a troca protónica de  $H^{+}$  e separar os elétrodos. Adicionalmente, existe um circuito elétrico externo que permite o fluxo de eletrões entre elétrodos.

Na figura 2.12 [40], é descrito um esquemático genérico de uma bateria VRB, onde é possível visualizar os reservatórios externos dos diferentes estados do vanádio em circuitos independentes. O fluxo de eletrólito nas células é assegurado por bombas de circulação externas.

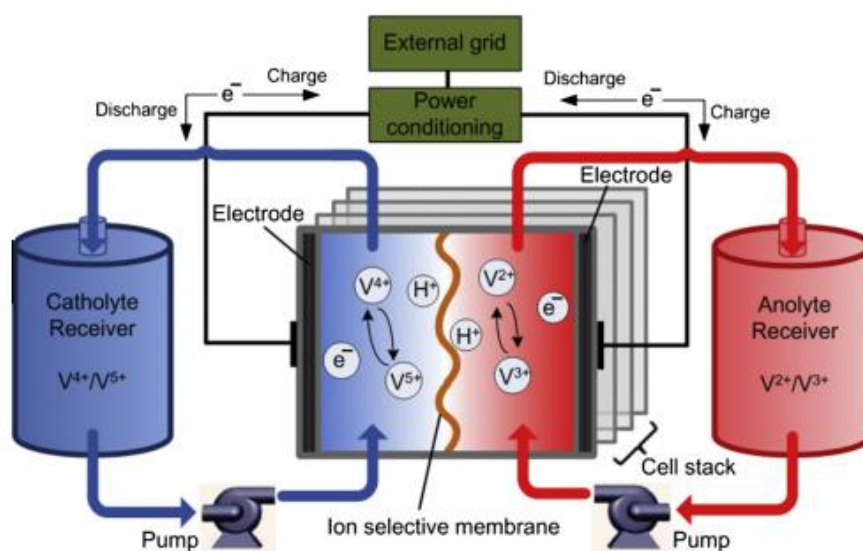


Figura 2.12 - Esquemático de uma bateria VRB, cortesia de Xing Lu e Mark Dooner.

As vantagens e desvantagens do uso desta tipologia de armazenamento de energia, são aceites conforme descrito na tabela 2.2 [41] :

Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens das VRB.

<b><i>Vantagens</i></b>	<b><i>Desvantagens</i></b>
<i>Capacidade de armazenamento escalonável</i>	<i>Baixa densidade energética (vs. baterias de iões de lítio)</i>
<i>Alta eficiência (70 – 90 %)</i>	<i>Temperatura de trabalho restrita (10-40°C)</i>
<i>Longa vida útil da bateria (~20 anos)</i>	<i>Degradação da bateria em caso de trabalho &gt; a 40°C</i>
<i>Sobredescarga sem impacto no desempenho da bateria</i>	<i>Necessidade de grande volume total do SAE</i>
<i>Baixa autodescarga</i>	<i>Soluções comerciais ainda não disponíveis</i>
<i>Eletrólito não inflamável ou explosivo</i>	<i>Grandes flutuações do preço do vanádio</i>

Um projeto para um SAE baseado em VRB, de 20 MWh de capacidade e potência máxima de 5 MW, encontra-se a ser desenvolvido pelo consórcio *South Korea's H2 Inc.* com previsão de conclusão em 2023, que supera o maior projeto em uso nos EUA (8 MWh de capacidade e 2 MW de potência) [42]. Graças à possibilidade de escalonamento da capacidade de armazenamento, as aplicações típicas têm vindo a ser associadas ao armazenamento de energias renováveis e otimização das redes energéticas.

## **2.4 – Battery Management System (BMS)**

Um componente essencial na projeção de dispositivos elétricos que dependem de armazenamento de energia elétrica (ex.: banco de baterias), é o sistema de gestão de baterias (BMS). O BMS consiste numa unidade de controlo que garante a performance ótima da energia armazenada na bateria, assim como a sua segurança em funcionamento. Para isto, o BMS necessita de supervisionar e controlar as fases de carga e descarga da bateria [43].

É aceite que as funcionalidades que um BMS deve ter, vão de acordo com as representadas na figura 2.13.

Uma constante e completa monitorização da bateria com mecanismos de atuação em cada célula irá prolongar a vida útil da bateria, aumentar a segurança na sua operação e facilitar o diagnóstico em caso de anomalia [44].

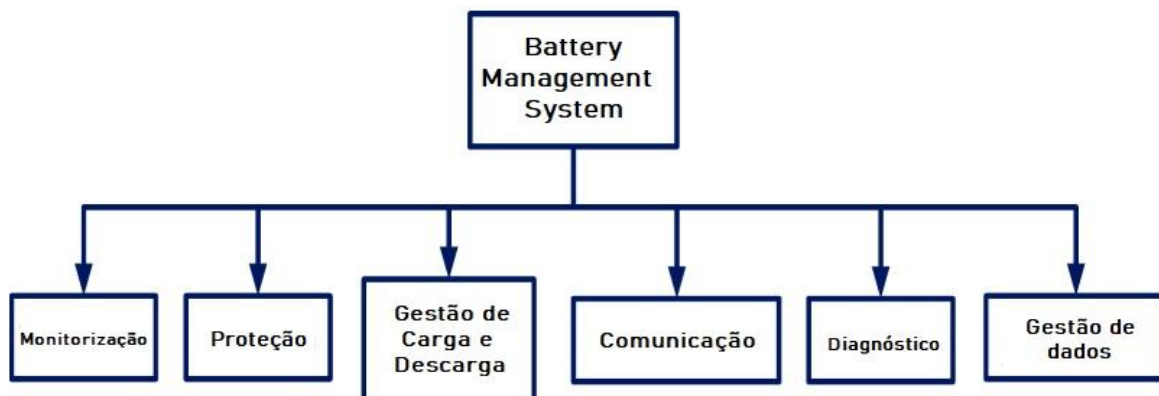


Figura 2.13 - Funções típicas de um BMS, adaptado de [44].

### 2.4.1 – Topologia

A arquitetura dos BMS é adaptada consoante o número de células associadas e complexidade do banco de baterias. No caso de baterias mais simples, com menos células de baterias, normalmente é utilizada uma arquitetura centralizada, onde os sensores de cada célula ligam diretamente à placa de circuitos integrados, constituída pela unidade de gestão das baterias (BMU) e circuitos de supervisão de células (CSC). À medida que o número de células aumenta, são utilizadas topologias ramificadas, que consistem em vários CSC que recebem dados de células adjacentes e enviam os dados por um canal para o BMU, conforme figura 2.14.

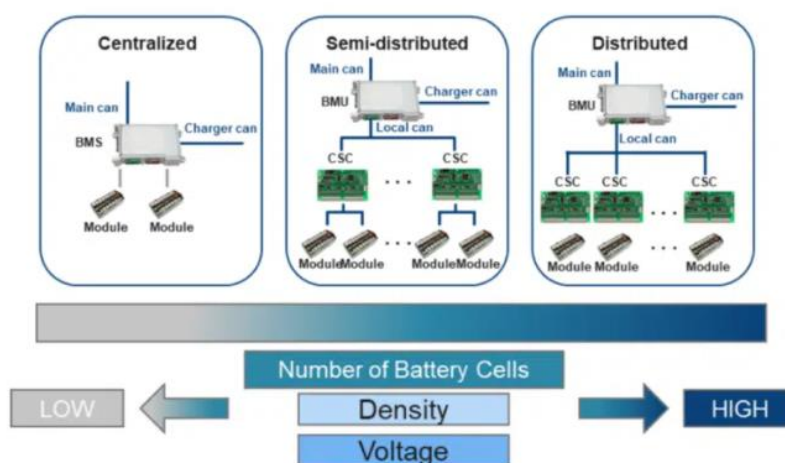


Figura 2.14 - Topologias de BMS, adaptado de [45]

Cada CSC tem um número limitado de células que consegue monitorizar, daí a necessidade de multiplicar o número de CSC para grandes bancos de baterias. Adicionalmente, como os dados do CSC vão para o BMU por apenas um canal, tem como vantagem a redução da cablagem necessária [45].

### 2.4.2 – Monitorização

É geralmente aceite que a implementação da monitorização da bateria assenta em 3 parâmetros:

- *State of Charge (SoC)* – representa, em percentagem, o estado de carga da bateria comparativamente ao seu máximo;
- *State of Health (SoH)* – é um parâmetro, em percentagem, que reflete a condição atual da bateria comparativamente a uma bateria idêntica nova;
- *Remaining runtime ( $t_r$ )* – estimativa de tempo restante que a bateria consegue fornecer corrente sob condições válidas de descarga.

Existem inúmeras formas de caracterizar o SoC, sendo a mais comum através da leitura da tensão aos terminais das células. Tendo em conta que a tensão na célula ao longo da fase de descarga segue uma forma aproximadamente linear, torna-se intuitivo estimar o SoC. Outras formas, como a contabilização da energia que entra e sai da bateria (por medição de corrente), também é regularmente usada assim como técnicas que envolvam uma combinação de leitura de tensão e corrente. A medição do SoC de cada célula num banco de baterias irá possibilitar aplicar técnicas de equilíbrio de tensão entre as mesmas.

O SoH pode ser obtido através da comparação dos registos dos ciclos, gravados em memória, que a bateria vai tendo ao longo do tempo. Comparando amostras das taxas de carga e descarga em diferentes pontos temporais possibilita estimar a condição atual da bateria.

### 2.4.3 – Controlo de carga e descarga

Um banco de baterias consiste num arranjo em série e em paralelo de células individuais. Mesmo dentro do próprio fabricante as células variam ligeiramente entre si, nomeadamente ao nível da sua resistividade interna e condutância. Estas diferenças traduzem-se em tempos de

## Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íões de lítio

carga e descarga ligeiramente diferentes entre células que irão ser ampliadas consoante o número de ciclos das células.

Células com um SoH mais baixo, irão carregar mais lentamente e descarregar mais rapidamente, comparativamente a células semelhantes com SoH mais elevado (ilustrado na figura 2.15). Isto é um problema, pois pode levar à sobrecarga ou sobredescarga das células, que se traduz num sobre aquecimento da célula, levando a perdas de desempenho, danos irreversíveis podendo mesmo incendiar ou explodir.

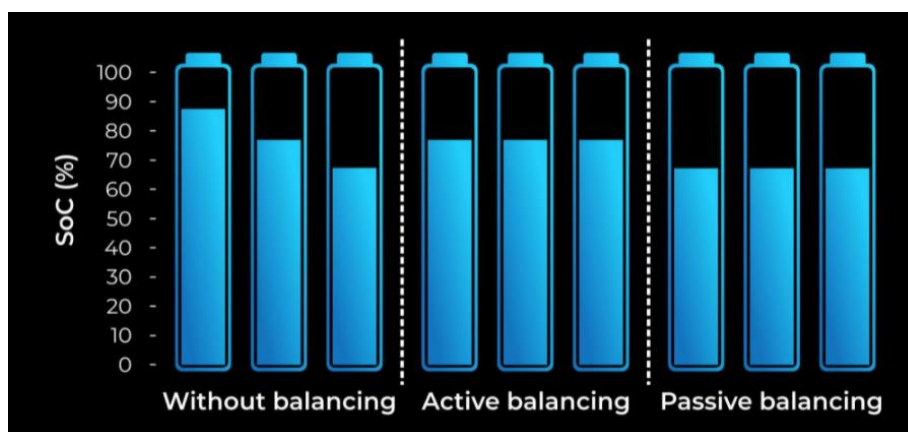


Figura 2.15 - Representação do desequilíbrio das células e consequência em caso de equilíbrio ativo e passivo, cortesia de [45].

Por forma a mitigar o desequilíbrio de tensões entre células e maximizar a energia utilizada na bateria, são utilizadas técnicas de equilíbrio, sendo estas classificadas em passivas e ativas, conforme diagrama da figura 2.16.

Em equilíbrio passivo é utilizada uma resistência ou uma carga por forma a baixar a tensão em excesso nas células com tensão mais elevada na bateria. Apesar de simples, é pouco eficiente pois existe dissipação de energia (forma de calor) que poderia ser utilizada para realizar trabalho [46].

No modo ativo, ao invés de dissipar energia, esta é transferida entre células através de um elemento ativo (uma bobine ou condensador), em que as células que carregam mais rápido fornecem energia para aquelas que demoram mais tempo [47]. Apesar de mais eficiente, importa compreender que existem perdas quando se carrega e descarrega o condensador na troca de energia, assim como existem perdas nos comutadores. Este método tem a limitação de

apenas células adjacentes poderem trocar energia, no entanto, existem variações deste circuito que permitem trocas entre células não adjacentes ultrapassando, assim, esta limitação.

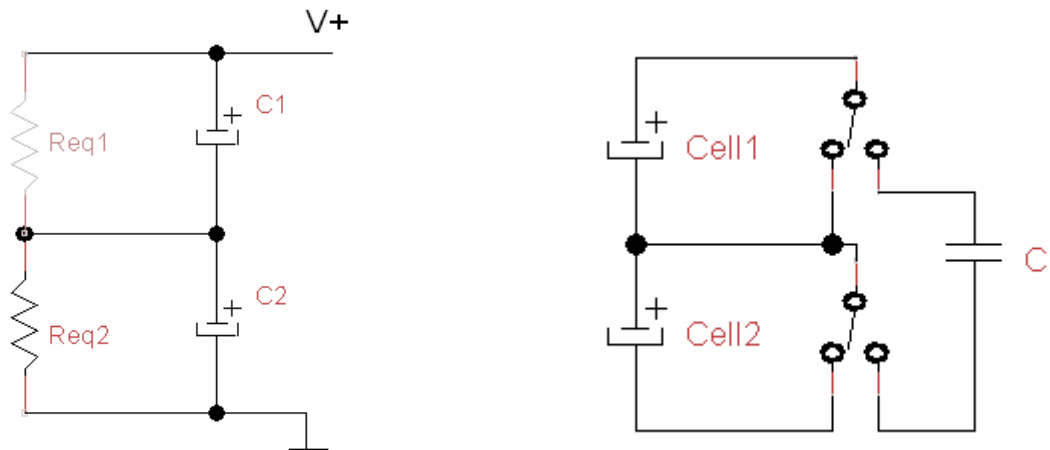


Figura 2.16 - Ilustração clássica de controlo de tensão passivo (esquerda) e ativo (direita).

## 2.5 – Sistemas de conversão de energia elétrica

Num veículo híbrido ou elétrico, é essencial assegurar a eficiência na interface entre o SAE e os motores elétricos propulsores. Tipicamente, em veículos híbridos, os SAE estão conectados a diversos tipos de conversores eletrónicos de potência [48], que permitem que o SAE receba corrente da rede através de conversores AC-DC e, paralelamente, possibilitam que o SAE forneça uma tensão à rede ou motores elétricos, através de inversores DC-AC.

Uma vez assegurada a conversão/retificação da energia, é necessário certificar que a tensão se encontra no nível pretendido e que o fluxo de energia é realizado no sentido necessário. Esta função é levada a cabo pelo conversor DC-DC.

A tipologia de um veículo híbrido que garanta bidirecionalidade do sentido de energia é aceite conforme a figura 2.17.

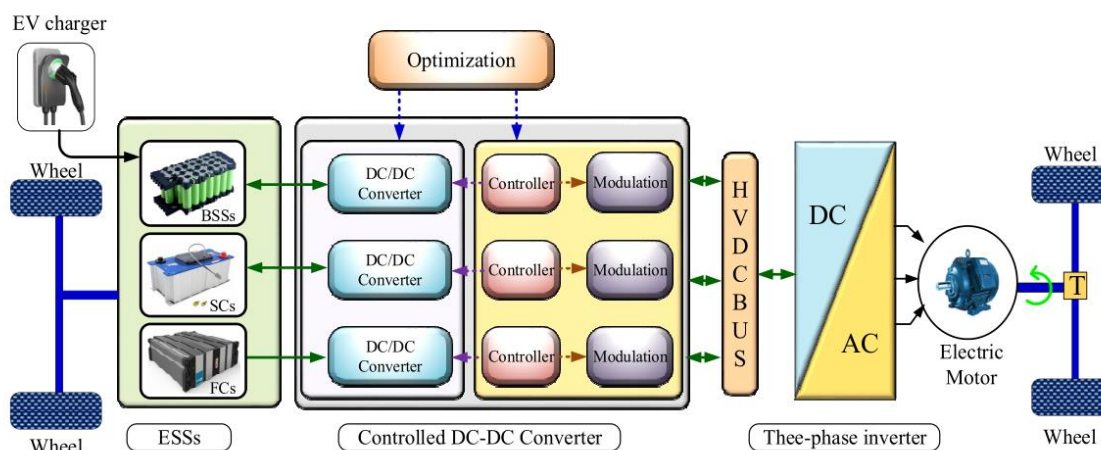


Figura 2.17 - Diagrama típico de um veículo híbrido, cortesia de Hossain em [48].

## 2.5.1 – Conversor DC/DC

Na arquitetura de um veículo híbrido, por norma o conversor faz interface entre o SAE e o barramento DC de alta tensão (HVDC BUS). A sua classificação é geralmente realizada consoante a sua função, conforme tabela 2.3:

Tabela 2.3 - Classificação de conversores DC-DC

<i>Classificação</i>	<i>Função</i>	<i>Controla</i>
<i>Redutor ou Buck</i>	<i>Reduzir tensão da rede para o SAE</i>	<i>Corrente para o SAE</i>
<i>Elevador ou Boost</i>	<i>Aumentar tensão do SAE para a rede</i>	<i>Tensão no HVDC BUS</i>

Para uma aplicação em veículos híbridos ou elétricos, cuja bidirecionalidade do fluxo de energia é imperativa, é utilizada uma combinação de ambos, denominada por redutor-elevador (*Buck Boost*), descrito simplifadamente na figura 2.18.

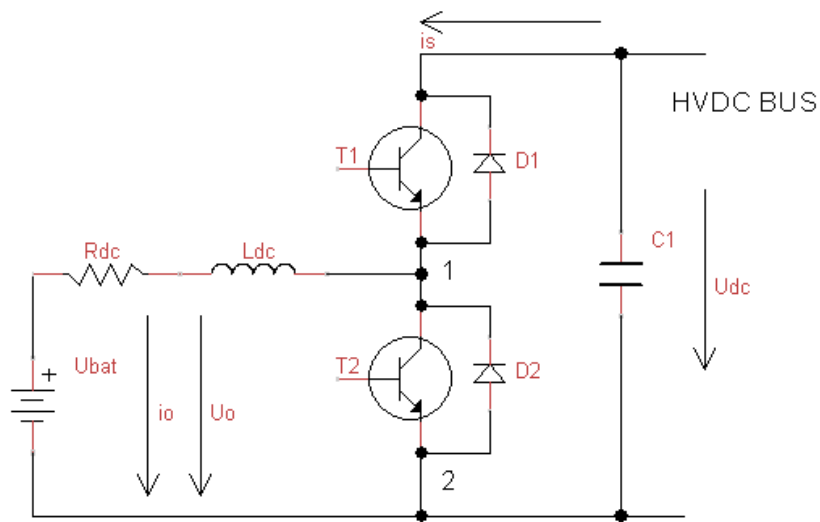


Figura 2.18 - Esquema clássico de um conversor redutor-elevador.

Os dispositivos T1 e T2 são completamente controlados (do tipo IGBT ou MOSFET) e funcionam em regime alternado<sup>2</sup>, ou seja:

$$\text{Para: } T1_{ON} \wedge T2_{OFF} \quad 0 < t < \delta t \quad (2.6)$$

$$\text{Para: } T1_{OFF} \wedge T2_{ON} \quad \delta t < t < T \quad (2.7)$$

Em que D representa o *duty cycle*, tem um valor compreendido entre [0; 1] e é dado por:

$$D_{T1} = \frac{T1_{ON}}{T1_{OFF}} \quad (2.8)$$

$$D_{T2} = 1 - D_{T1} \quad (2.9)$$

Assim sendo, é fácil entender que controlando o *duty cycle* dos semicondutores (SC) é possível impor o sentido e intensidade da corrente e, conseqüentemente, identificar se o conversor está no modo de funcionamento redutor ou elevador, conforme a tabela 2.4:

<sup>2</sup> Apesar dos SC funcionarem em regime alternado, existe um tempo morto entre os períodos de comutação como medida preventiva para evitar um curto-circuito no sistema.

Tabela 2.4 - Modos de funcionamento do conversor DC-DC e suas condições.

<b>Modo funcionamento</b>	<b>Condição</b>
<i>Redutor ou Buck</i>	$D_{T1} > \frac{U_{bat}}{U_{dc}}$
<i>Elevador ou Boost</i>	$D_{T2} < \frac{U_{bat}}{U_{dc}}$

Adicionalmente, os SC encontram-se equipados com díodos (D1 e D2 na figura 2.18) em antiparalelo. A presença da resistência,  $R_{dc}$ , deve-se a efeitos residuais de resistividade do banco de baterias. O condensador C1, representa a capacidade que irá fornecer a tensão ao HVDC BUS. Tipicamente a escolha dos SC no conversor DC-DC é efetuada consoante a potência de funcionamento e frequência de comutação.

## 2.5.2 – Conversores AC/DC e DC/AC

Face à dinâmica energética bidirecional num veículo híbrido, existe a necessidade de adaptar as tensões e correntes conforme o fluxo de energia. Na fase de carregamento, será necessário retificar a tensão AC proveniente da rede, assim como na fase de motorização é necessário ondular a tensão DC do SAE, para que esta seja compatível com as máquinas elétricas ou até mesmo a rede [49].

É comum implementar estes conversores com dispositivos completamente controlados (MOSFETs, IGBTs, GTOs), permitindo que o conversor funcione de forma autónoma num regime dinâmico. Como o caso de estudo consiste numa tipologia de tensão da micro-rede (navio), apresenta-se um ondulador de tensão trifásico em ponte, em série com um conversor DC-DC de 2 quadrantes conforme a figura 2.19.

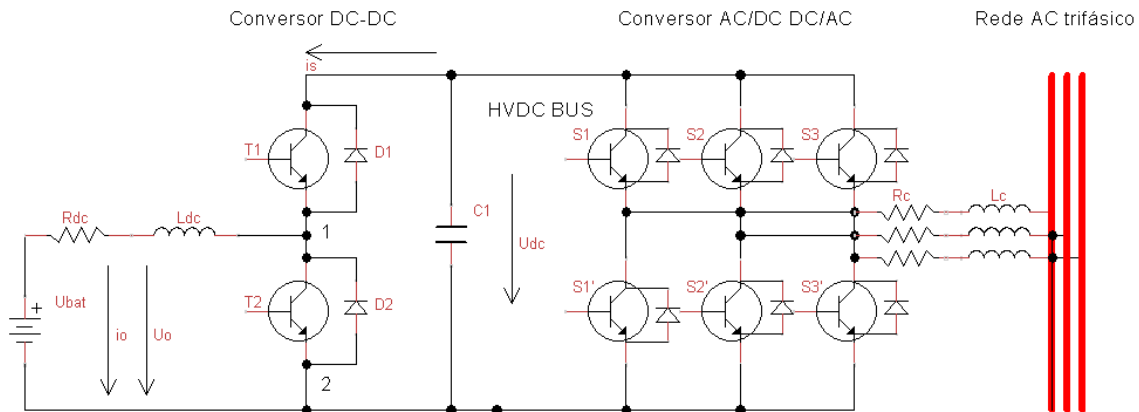


Figura 2.19 - Esquema clássico de SAE conectado indiretamente a uma rede trifásica. À esquerda o SAE encontra-se ligado a um conversor DC-DC. À direita um ondulator trifásico ligado a uma rede trifásica.

Um benefício na utilização de dispositivos semicondutores (SC) completamente controlados, em adição a técnicas de controlo que utilizem elevada taxa de manobras dos SC, como o *pulse width modulation*, é a geração de distorção harmónica de ordem elevada. Esta distorção de alta frequência é facilmente atenuada, fazendo com que as correntes obtenham uma forma final mais perto da sinusoidal, comparativamente a outros tipos de controlo mais básicos.

Com técnicas de comando apropriadas aplicadas aos SC, torna-se possível utilizar a ponte trifásica como ondulator trifásico ou retificador, não existindo a necessidade de duplicar circuitos. Assim no modo ondulator, a tensão DC disponível no HVDC será convertida em grandezas sinusoidais enquanto no modo retificador, a tensão AC trifásica disponível na rede será retificada em DC, alimentando o HVDC e posteriormente o SAE.

## Capítulo 3

### Caso de estudo NRP *Almirante Gago Coutinho*

O NRP *Almirante Gago Coutinho* é um navio hidrográfico da Marinha Portuguesa com a função de realizar missões de carácter científico em águas nacionais e internacionais. Além disso, funciona como unidade de apoio às operações navais e campanhas oceanográficas para estudo do ambiente marinho.

O navio tem um comprimento de 68.3 metros e um deslocamento de 2285 toneladas. Devido ao objetivo para que este navio foi construído, deteção submarina, o mesmo foi projetado para ter uma discreta assinatura acústica. Para tornar isto possível, são utilizados grupos eletrogéneos diesel e motores elétricos de corrente contínua para propulsão, sendo que estes últimos são menos ruidosos e têm menos vibrações que os motores diesel convencionais.

#### 3.1 – Diagrama elétrico geral

O diagrama elétrico do NRP *Almirante Gago Coutinho*, de um modo simplificado, pode ser considerado conforme a figura 3.1. Os quatro grupos eletrogéneos estabelecem uma tensão de 600 V AC a uma frequência de 60 Hz ao barramento principal.

O quadro elétrico principal fornece energia aos motores de propulsão elétrica. Os motores elétricos principais são de corrente contínua cuja retificação é realizada por pontes retificadoras a tirístores.

Agregado ao barramento principal, encontram-se os diversos quadros elétricos secundários com tensões apropriadas à sua finalidade. Os equipamentos auxiliares do navio (bombas de incêndio, ar condicionado, bombas de refrigeração, etc), encontram-se agrupados no quadro elétrico de 440V 60Hz também interligado ao quadro principal por três transformadores trifásicos 600/440V.

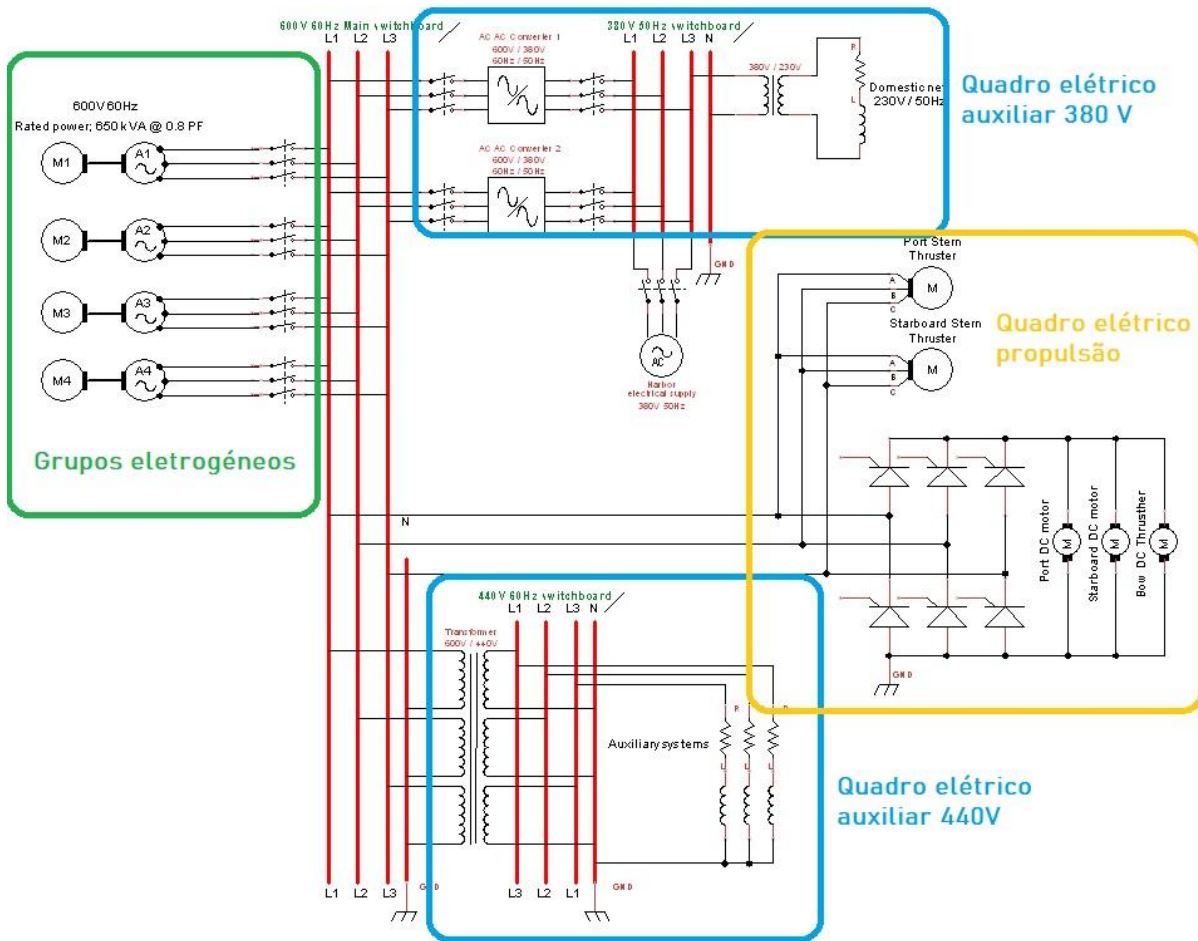


Figura 3.1 - Esquema elétrico simplificado do NRP *Almirante Gago Coutinho*.

### 3.2 – Produção de energia elétrica

A produção de energia a bordo do navio em estudo está a cargo de 4 grupos eletrogéneos de combustão interna da marca *Caterpillar* e têm a tipologia de um motor V12 a quatro tempos com capacidade máxima de 650 kW. Cada grupo é controlado por forma a manter uma velocidade angular constante de 1200 rpm.

#### 3.2.1 – Grupos eletrogéneos

O gerador de corrente alterna da marca *Kato Engineering* é do tipo síncrono sem escovas. O grupo é controlado por um *Automatic Voltage Regulator (AVR)* que ajusta o acelerador do

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

---

motor por forma a manter uma tensão de saída de 600V AC RMS ph-ph apesar das constantes oscilações de carga no navio.

Face à tipologia do alternador, é intuitivo chegar ao número de pólos sabendo a velocidade angular quando este está sincronizado com a rede ( $n_s = 1200$  rpm) e a frequência da tensão que é 60 Hz. Utilizando a Eq. 3.1 obtemos o número de pólos igual a 6.

$$p = \frac{(120 \cdot f)}{n_s} \quad (3.1)$$

### **3.3 – Gestão do comissionamento dos grupos eletrogéneos**

Antes de expor formas de melhorar a eficiência energética a bordo do navio em estudo, é necessário analisar a forma como é realizada a gestão dos grupos eletrogéneos.

#### **3.3.1 – Gestão atual do comissionamento de grupos**

Existem 4 grupos eletrogéneos que podem funcionar em modo paralelo. O comissionamento dos grupos é realizado de forma manual e de acordo com a velocidade a que o navio irá navegar nas próximas horas. Se o navio estiver a realizar uma viagem à velocidade máxima disponível, este irá necessitar de mais potência disponível para os motores elétricos (maior número de grupos eletrogéneos em funcionamento simultâneo), em contraste, se o navio realizar sondagens (a baixa velocidade), irá necessitar de menos potência e, conseqüentemente, será necessário menos grupos em comissionamento simultâneo.

De uma forma geral, a gestão dos grupos eletrogéneos é sempre feita de modo a manter uma reserva energética suficiente, para que no caso de um dos grupos eletrogéneos tenha de ser parado de emergência, os restantes consigam sustentar a carga existente no barramento principal, evitando assim situações de “falha total de energia (TLF)”.

Recorrentemente, parte dos casos de TLF, advém de paragens inadvertidas de um dos grupos eletrogéneos que, conseqüentemente, ativam as proteções de sobrecarga dos disjuntores dos geradores ou grupos em funcionamento. Assim sendo, para evitar casos de TLF, é assegurado a reserva energética por um grupo eletrogéneo extra. A gestão destes grupos pode ser resumida de acordo com a seguinte figura.

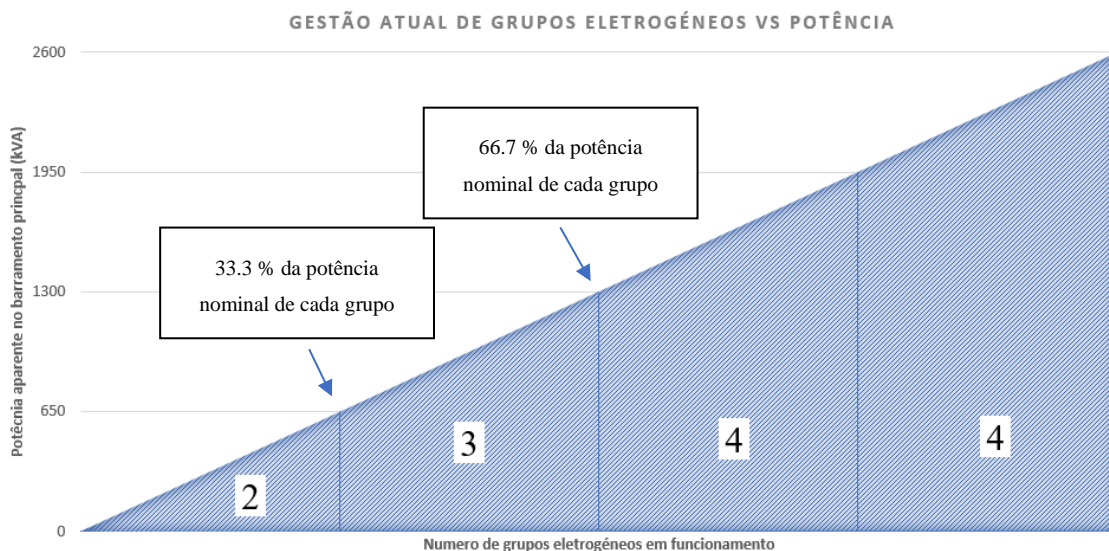


Figura 3.2- Gestão atual do comissionamento de grupos eletrogéneos.

Apesar da gestão atual assegurar uma reserva energética suficiente para não acontecerem casos de TLF, esta é longe do ideal em termos de eficiência energética. Pois, esta gestão necessita, permanentemente, de um grupo eletrogéneo comissionado a mais do que o estritamente necessário. Como consequência, os grupos funcionam em regimes de carga baixa, comparativamente à sua capacidade máxima, que tendem a ser não ideais em termos de eficiência energética.

Analisando os dados do fabricante, na tabela 3.1, referentes aos consumos de combustível para diferentes níveis de carga, entende-se que ao forçar os grupos a funcionar a percentagens de esforço entre os 33.3% a 66.7% não é o cenário ideal. Cenário este que pode piorar para casos em que existem cargas com consumos médios baixos, mas com picos elevados (cenários em que navio se encontra em posição dinâmica ou manobras de atracação), fazendo com que se tenha de ter, permanentemente, um número de grupos em funcionamento por forma a cobrir os picos de carga.

## Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íões de lítio

Por forma a analisar a eficiência da gestão dos grupos eletrogéneos, utilizaram-se os consumos nominais (l/h) de combustível disponíveis no manual do fabricante. A partir desse valor, foi extraído o SFC para diferentes percentagens de carga, de acordo com a tabela 3.1.

Analisando a tabela 3.1 verifica-se que estes motores diesel, têm o seu ponto de eficiência ótima em torno do funcionamento a 75% da sua capacidade máxima, este é um valor comum que tende a ir de acordo com outros modelos de motor da mesma marca [50].

Tabela 3.1 - Consumo de combustível dos grupos eletrogéneos em função da carga [51].

(%) Carga	25	50	75	100
<b>kW</b>	153.8	307.5	461.3	615.0
<b>Consumo (L/h)</b>	68.2	91.5	122.4	174.9
<b>Consumo (g/h)</b>	61380.0	82350.0	110160.0	157410.0
<b>SFC (g/kWh)</b>	399.2	267.8	238.83	256.0

É possível melhorar a eficiência energética atual, se o intervalo de operação dos grupos eletrogéneos for modificado e idealmente restrito ao intervalo de eficiência ótima, como demonstra a figura 3.3.

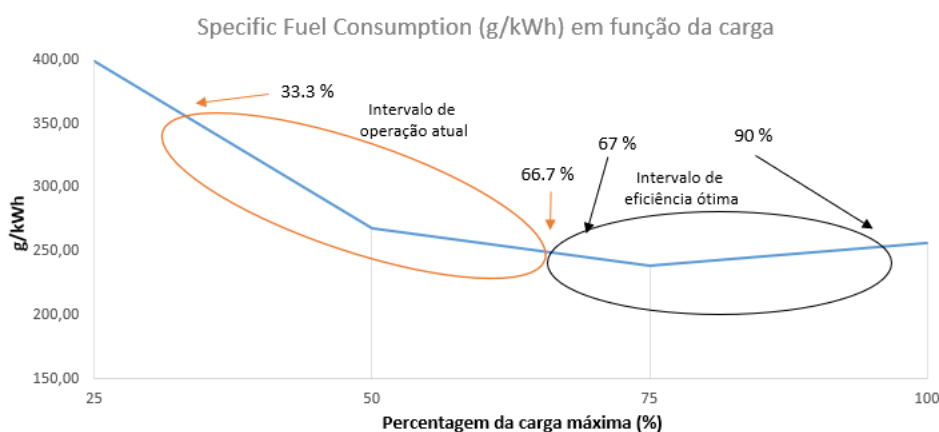


Figura 3.3 - Consumo de combustível em função da carga dos grupos eletrogéneos.

### 3.4 – Gestão proposta para melhorar a eficiência energética

Conforme visto na secção anterior, o fator que está a limitar o funcionamento na banda dos 33.3% a 66.7%, é o facto da reserva energética ter de ser assegurada por um grupo eletrogéneo.

#### 3.4.1 – Reserva energética

Com o intuito de eliminar a restrição da banda de funcionamento, o SAE será dimensionado por forma a ter capacidade de assegurar a reserva energética durante o tempo necessário para comissionar, em segurança, um grupo eletrogéneo.

Sem a restrição anterior, torna-se possível ir ao encontro do intervalo de eficiência ótima, conforme a figura 3.4. No entanto, não é possível fixar o intervalo de funcionamento dos grupos, pois irá depender sempre da potência instantânea consumida pelo navio.

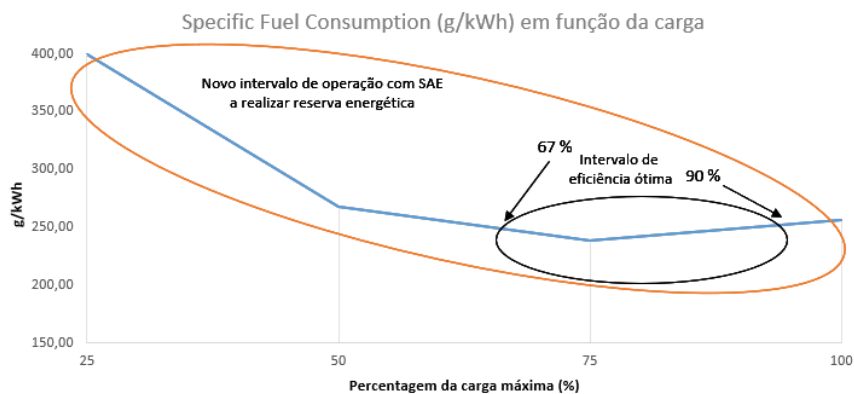


Figura 3.4 – Intervalo de operação dos grupos eletrogéneos com SAE a realizar reserva energética.

#### 3.4.2 – Restrição do intervalo de funcionamento dos grupos eletrogéneos

Caso o navio dispusesse de grupos eletrogéneos de dimensões diferentes ou de perfis de SFC diferentes, seria possível criar um controlo de comissionamento dos grupos por forma a maximizar a eficiência energética consoante a potência necessária. No entanto, o navio possui 4 grupos idênticos e presume balanço de potências iguais entre eles. Assim, a alternativa para fixar a banda de funcionamento dos grupos, terá de passar pela utilização do SAE.

A gestão de grupos proposta neste trabalho, terá como objetivo restringir o intervalo de funcionamento na percentagem de carga em que este é mais eficiente, ou seja, de 67% (ou 429 kVA) a 90% (ou 590 kVA) da carga máxima. Em todos os cenários, o SAE será encarregue de fornecer o remanescente de potência ativa, de forma aos grupos eletrogéneos manterem-se na banda de eficiência ótima, como é possível visualizar na figura 3.5.

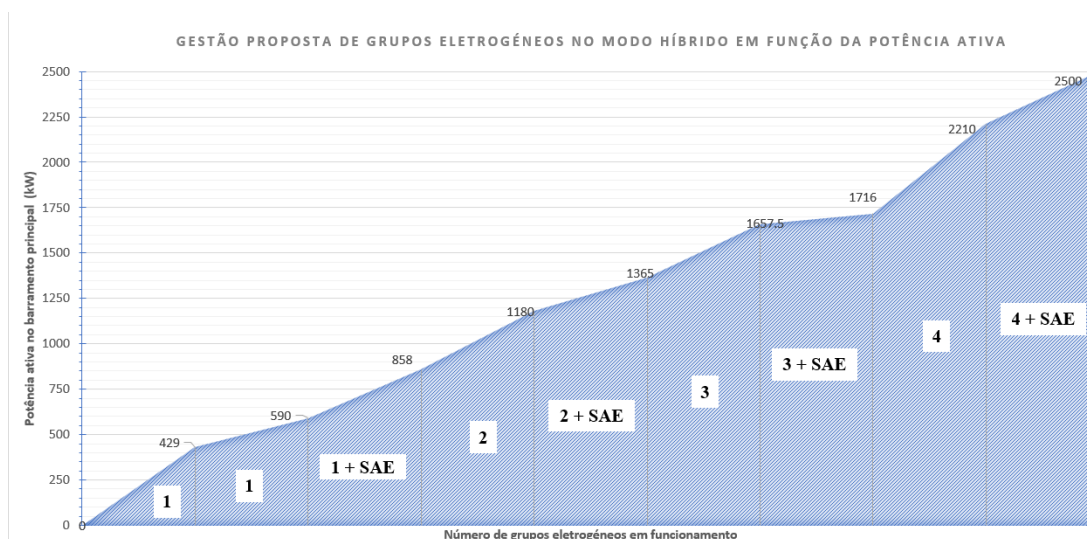


Figura 3.5 - Gestão proposta de grupos eletrogéneos com recurso ao SAE em função da potência necessária no barramento principal.

Analisando a figura 3.5, constata-se que apenas existem cenários para o SAE fornecer energia ao navio. Por forma a acautelar um cenário que o SAE seja carregado, nos períodos em que navio se encontra com cargas baixas (cenário em que a carga é menor que a 429 kW, como por exemplo: fundeado ou a pairar), o gerador é forçado a manter-se nos 75% de carga (regime de máxima eficiência) e o excesso de corrente será usado para carregar o SAE.

### 3.4.3 – Compensação do fator de potência

A carga a bordo dos navios tende a ser predominantemente indutiva, devido à presença de equipamentos tais como: motores elétricos, transformadores, solenoides, compressores, entre outros. Conforme será exposto no subcapítulo 3.7, o fator de potência (FP), tende a oscilar entre 0.60 e 0.80, que é um valor particularmente baixo, levando à necessidade dos grupos eletrogéneos produzirem mais potência aparente (S), para produzir a mesma potência ativa (P), baixando a eficiência energética, conforme equação 3.2.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{VI \cos \theta}{VI} = \cos \theta \quad (3.2)$$

Particularmente, a carga indutiva causa um atraso ( $\theta$ ) na corrente face à tensão, conforme ilustrado na figura 3.6.

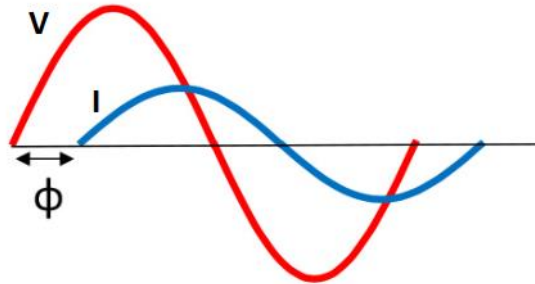


Figura 3.6 - Ilustração do atraso na corrente causado por cargas indutivas.

Aproveitando o facto deste projeto contemplar um conversor bidirecional para carregar e descarregar a bateria, torna-se possível compensar o FP da rede do navio sem adicionar dispositivos extras, tais como filtros ativos ou passivos [51].

A integração do conversor bidirecional e do banco de baterias encontra-se resumidamente descrito na figura 3.7. Utilizando o conversor bidirecional em conjunto com um algoritmo de controlo da carga/descarga das baterias, torna-se possível consumir/fornecer uma corrente sinusoidal com FP controlado.

Deste modo, o conversor bidirecional terá como função controlar a potência reativa da rede, por forma a que os grupos eletrogéneos não “vejam” a componente indutiva da carga e tenham apenas de fornecer potência ativa à rede. Adicionalmente, o banco de baterias irá contribuir com potência ativa, nos momentos em que os grupos eletrogéneos estejam a funcionar em regimes menos eficientes.

Uma vez efetuada a compensação da potência reativa da carga, de tal forma que o FP do ponto de vista dos grupos seja, aproximadamente, 1, a potência aparente produzida pelos grupos será, aproximadamente igual à potência ativa da carga, conforme a Eq. 3.3.

$$S_{GD}^2 = P_{carga}^2 + Q_{carga}^2 \rightarrow Q_{carga} \approx 0 \Rightarrow S_{GD} \approx P_{carga} \quad (3.3)$$

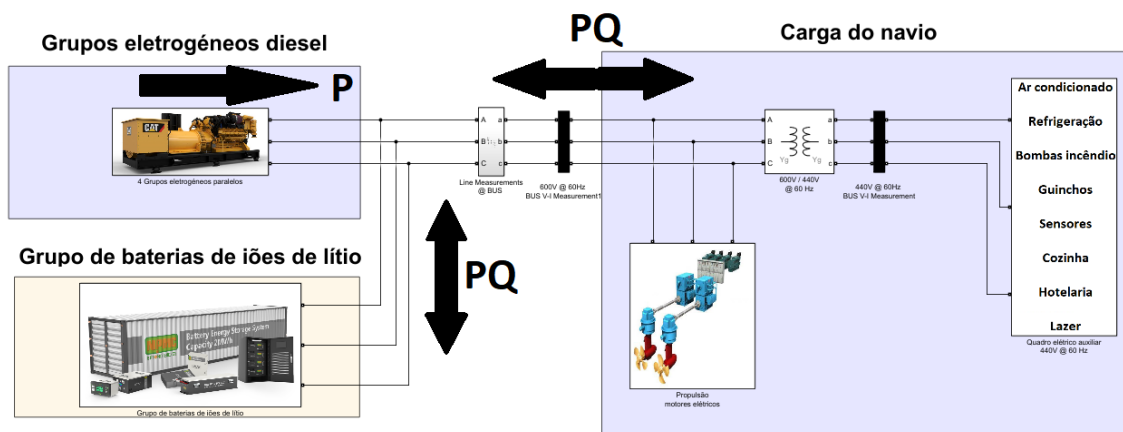


Figura 3.7 – Diagrama de integração do conversor bidirecional e banco de baterias na rede do navio.

### 3.5 – Motores elétricos propulsores

A bordo existem 2 motores elétricos propulsores de corrente contínua de 800 cavalos de potência cada, fabricados pela marca *General Electric*. Os motores DC são de excitação separada e de acoplamento direto ao veio. A velocidade de rotação máxima dos motores é 185 rpm com um consumo nominal de 890A a 750V. Em termos de potência corresponde a 442 kW já considerando a eficiência mecânica de aproximadamente 0.85 [52].

Estes motores elétricos são responsáveis por mais de 70% do consumo total do navio quando este se encontra a navegar à sua velocidade cruzeiro<sup>3</sup>. Não sendo possível obter a partir do fabricante o consumo dos motores em função da velocidade do navio, este consumo terá de ser estimado de uma outra forma, conforme descrito na próxima subsecção.

<sup>3</sup> Velocidade produzida a um regime de 150 rpm nos motores elétricos propulsores.

### 3.5.1 – Método empírico - Velocidade do navio em função da potência

Para a realização deste trabalho, foi assegurado o acesso aos registos horários do diário de navegação e dos painéis de instrumentação do Quadro Elétrico Principal (QEP), referentes ao período de 2020 a 2021. Os dados disponíveis, sem tratamento, encontram-se conforme a tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Registos horários do painel de instrumentação dos motores propulsores à esquerda e registos horários do diário de navegação à direita.

MÁQUINAS PRINCIPAIS									
HORAS	BB				EB				
	ARMADURA I	V	CAMPO I	RPM	HORAS	ARMADURA I	V	CAMPO I	RPM
2	460	560	70	90	2	580	580	65	90
3	460	560	70	140	3	590	590	65	140
4	460	560	70	140	4	590	590	65	140
5	440	560	70	140	5	500	560	65	140
6	440	560	70	140	6	500	560	65	140
7	440	560	70	140	7	500	560	65	140
8	460	560	70	140	8	480	560	65	140
9	440	560	70	140	9	480	580	65	140
10	440	560	70	140	10	460	560	65	140
11	180	320	70	80	11	180	320	65	80
12	340	460	70	120	12	360	480	65	120
13	520	560	70	140	13	480	560	65	140
14	500	590	70	90	14	500	560	65	90
15	500	590	70	90	15	500	580	65	90
16	460	580	70	90	16	490	580	65	90
17	200	320	70	60	17	190	320	65	60
18	200	320	70	60	18	190	320	65	60
19	200	320	70	60	19	190	320	65	60
20	500	560	70	140	20	500	560	65	140
21	280	420	70	100	21	280	420	65	100
22	280	420	70	100	22	280	420	65	100
23	280	420	70	105	23	280	420	65	105
24	280	420	70	105	24	280	420	65	105
1	280	420	70	105	1	280	420	65	105

REGISTOS NAVEGAÇÃO						
Hora	Velocidade (kt)	RPM's	Condições METOC (Vento, Ondulação, etc)			
01:00	4	90				
02:00	6	140				
03:00	7	140				
04:00	6	140				
05:00	7	140				
06:00	7	140				
07:00	8	160				
08:00	6	140				
09:00	7	140				
10:00	4	80				
11:00	5	120				
12:00	6	140				
13:00	5	90				
14:00	4	90				
15:00	4	90				
16:00	3	60				
17:00	4	60				
18:00	3	60				
19:00	5	140				
20:00	4	100				
21:00	4	100				
22:00	4	105				
23:00	5	105				
00:00	4	105				

A forma mais simples de descrever a relação entre velocidade e potência, seria realizar uma correspondência direta entre a velocidade e o consumo dos motores para cada hora. No entanto, o resultado obtido não retrataria a realidade na maioria dos casos, devido ao elevado impacto que as condições meteorológicas surtem na velocidade do navio. Caso a amostragem dos dados fosse retirada num dia cujas condições fossem favoráveis, ocorreria uma subestimação da relação entre o consumo dos motores e a velocidade do navio.

Por forma a atenuar os efeitos que as condições meteorológicas têm nos dados da velocidade do navio, e obter uma relação mais fidedigna independente de fatores externos, propõe-se o tratamento de dados descrito na figura 3.8.

Os motores elétricos propulsores (MEP), trabalham numa janela de rpm compreendida entre os 0 aos 180 rpm. Assim sendo, foram elaborados 18 regimes, igualmente espaçados, em que os MEP, tipicamente, operam (separados por 10 rpm cada). Para cada regime foram retiradas 14

amostras de consumo e velocidade, e efetuadas as médias para cada variável (conforme a tabela 3.3)<sup>4</sup>.

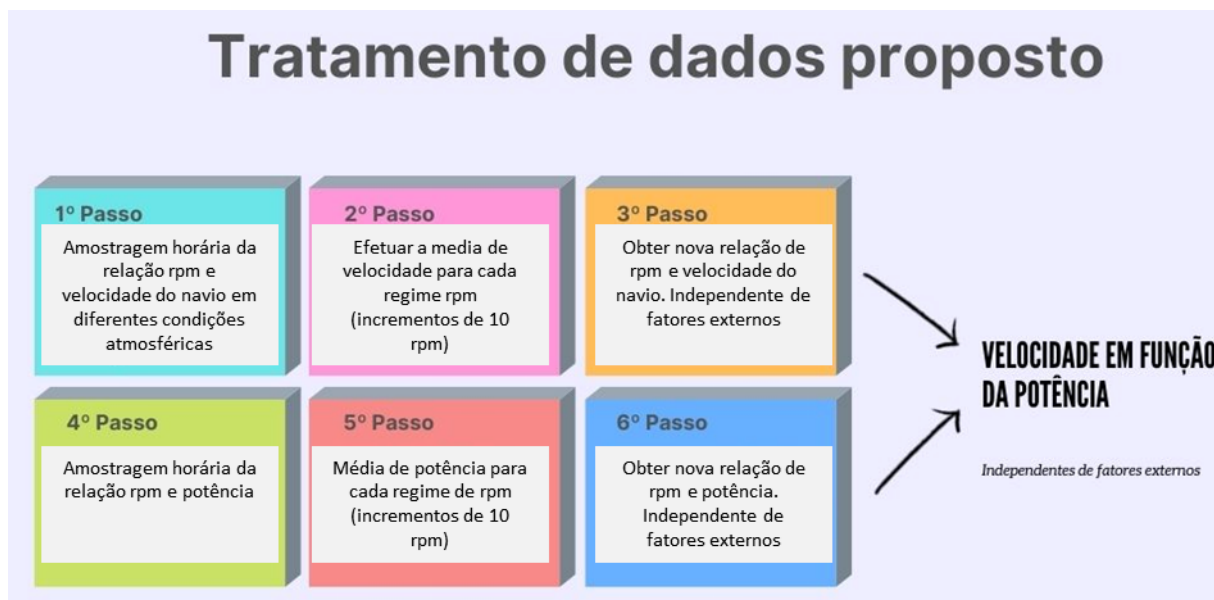


Figura 3.8 - Tratamento de dados proposto

O 1º passo foi realizado com recurso a registos de dias diferentes, em que o navio navegou em rumos, condições atmosféricas e estados de mar aleatórios. O 4º passo, como não é influenciado por fatores externos, foi retirado em dias aleatórios. A amostragem do 1º e 4º passo foi realizada para cada um dos 18 regimes.

<sup>4</sup> Existem regimes de rpm menos praticados que outros, pelo que existem regimes em que apenas foi possível coletar 11 amostras ao invés de 14 como é o caso do regime das 140 rpm.

Tabela 3.3 - Amostragem horária de consumo dos motores e velocidade por regime de rpm (incremento de 10 rpm)

Nº	BB				EB				Velocidades
	i	V	I	RPM	i	V	I	RPM	
1	480	580	70	140	480	560	65	140	3
2	480	580	70	140	460	560	65	140	7
3	480	580	70	140	460	560	65	140	11
4	520	580	70	140	500	560	65	140	4
5	520	560	70	140	520	560	65	140	8
6	460	560	70	140	480	560	65	140	8
7	440	560	70	140	480	560	65	140	10
8	440	560	70	140	480	560	65	140	4
9	440	560	70	140	480	560	65	140	9
10	500	580	70	140	520	560	65	140	3
11	500	580	70	140	500	560	65	140	8
12									4
13									6
14									3
									7,57 Média

Nº	BB				EB				Velocidades
	i	V	I	RPM	i	V	I	RPM	
1	420	520	70	130	540	540	65	130	7
2	420	520	70	130	540	540	65	130	7
3	400	520	70	130	420	520	65	130	7
4	400	520	70	130	420	520	65	130	8
5	400	520	70	130	420	520	65	130	7
6	400	520	70	130	420	520	65	130	7
7	380	520	70	130	400	520	65	130	6
8	400	520	70	130	400	520	65	130	6
9	400	520	70	130	400	520	65	130	7
10	400	520	70	130	400	520	65	130	5
11	400	520	70	130	400	520	65	130	5
12	420	500	70	130	430	530	65	130	4
13	420	520	70	130	340	480	65	130	5
14	420	520	70	130	340	480	65	130	7
									6,29 Média

Realizando os 2º e 4º passos e traçando a sua relação graficamente obtemos a figura 3.9.

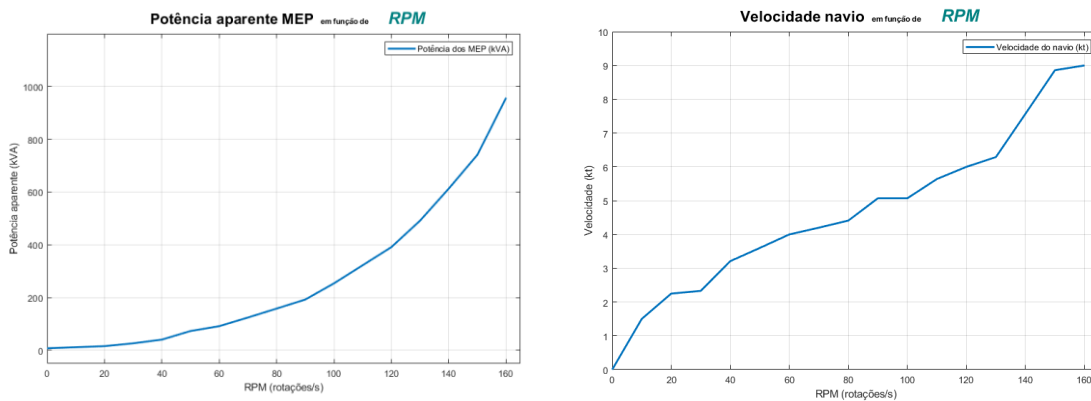


Figura 3.9 - À esquerda a relação entre potência aparente dos MEP e rpm e à direita a relação da velocidade do navio em função das rpm.

Tendo uma variável em comum, as rpm, tanto nos registos de navegação como nos registos do QEP foi possível traçar a relação entre os valores registados da velocidade e a potência aparente, conforme figura 3.10.

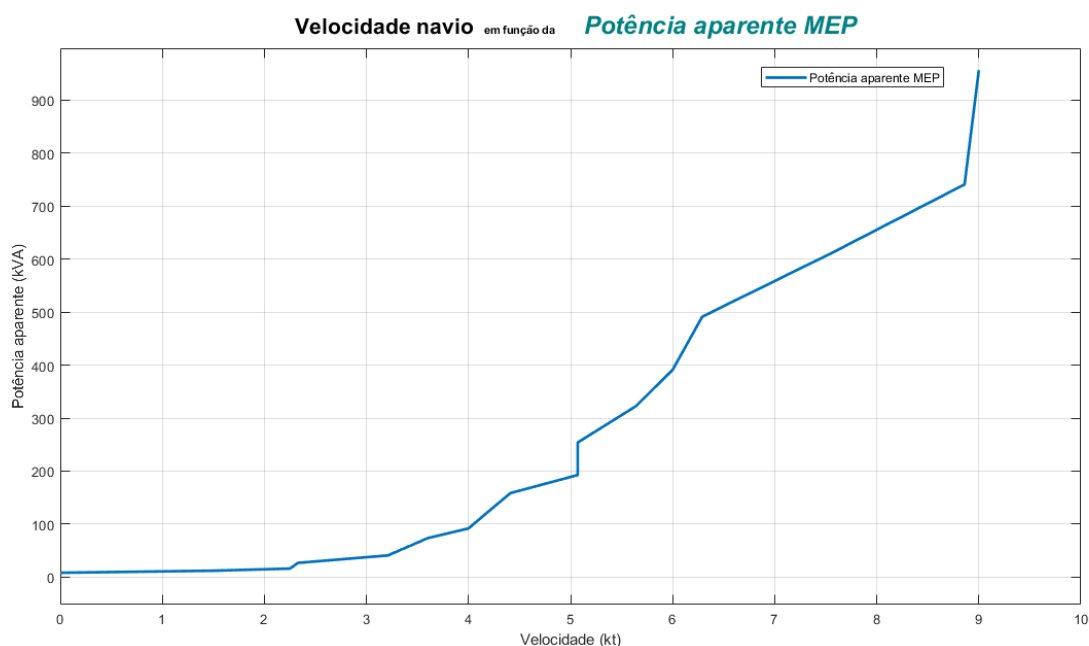


Figura 3.10 – Relação entre a velocidade do navio e a potência aparente.

Os dados da figura 3.10 demonstram a relação entre as duas variáveis, no entanto, para uso posterior será útil dispor de uma equação que descreva a relação. Utilizando a ferramenta “*Polyfit*” do *software Matlab* e introduzindo os dados das duas variáveis, esta devolve os coeficientes de uma equação polinomial de grau “n” (neste caso uma equação de 3º grau foi a que melhor se adaptou), que melhor se adapta aos dados inseridos. A igualdade que descreve a relação entre a velocidade do navio (em kt) e a potência aparente (em kVA, assumindo um PF = 0.8), é dada pela equação 3.4:

$$S(V_s) = -0.983.V_s^3 + 26.761.V_s^2 - 67.573.V_s + 26.970 \quad (3.4)$$

em que S representa a potência aparente em kVA e  $V_s$  a velocidade do navio em kt.

Por forma a validar esta relação, a mesma será comparada com o modelo teórico da relação geral entre a potência e velocidade de um navio genérico, na subsecção 3.5.2.

### 3.5.2 – Método teórico - Velocidade do navio em função da potência

A relação que a potência de propulsão tem com a velocidade dos navios, é geralmente descrita conforme a equação 3.5 [53].

$$MP = k * VS^3 \tag{3.5}$$

Em que “MP” (de *Motor Power*) designa a potência de propulsão em kW, “k” é uma constante e “VS” a velocidade do navio. Analisando a equação 3.5 verifica-se que a potência varia, aproximadamente com o cubo da velocidade. A constante “k” foi calculada sabendo a potência máxima de 443 kW por motor, para o navio realizar a sua velocidade máxima de 9 kt. De um modo gráfico pode-se visualizar a potência aparente (em kVA), teórica, necessária em função da velocidade na figura 3.11 (cor azul), de acordo com a equação 3.5.

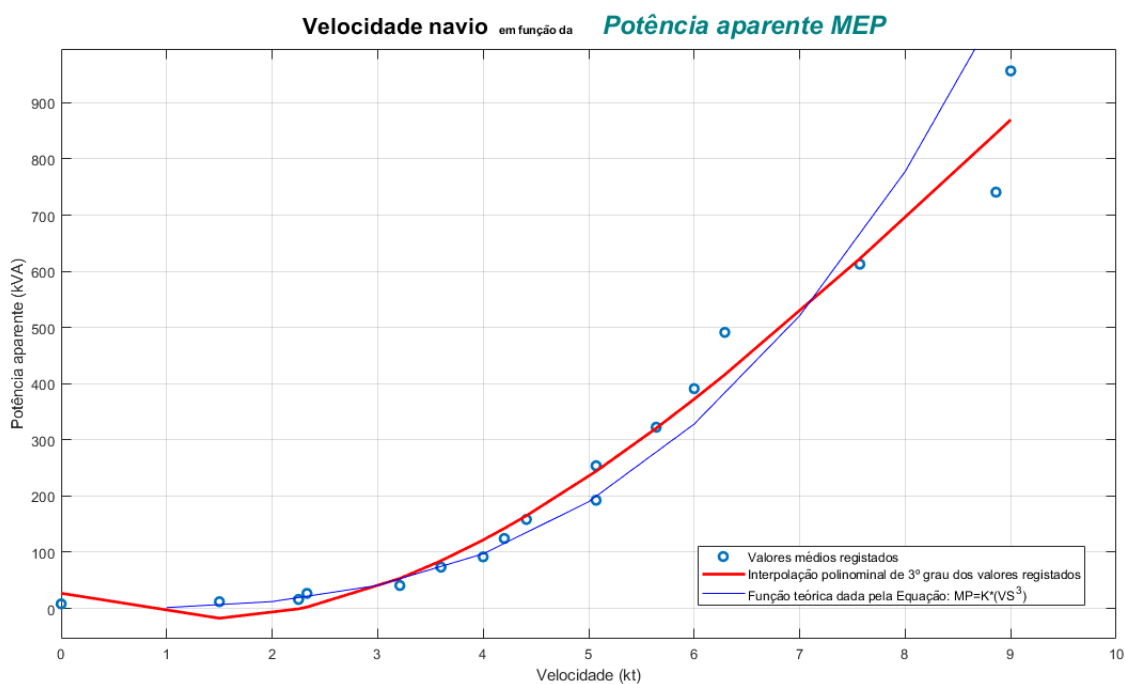


Figura 3.11 - Potência de propulsão (kVA), assumindo FP = 0.8, em função da velocidade do navio (kt).

Analisando a figura 3.11, é notório que a relação obtida na figura 3.10 tende a seguir a relação teórica descrita na equação 3.5. Uma vez validada a equação 3.4, esta será usada para estimar a potência aparente nos perfis de utilização, descrita na seção seguinte.

De notar, que as relações utilizadas nas equações 3.4 e 3.5 são generalistas e não contemplam inúmeros fatores que influenciam a relação entre a velocidade do navio e potência de propulsão, tais como a forma, dimensão, estado e a hidrodinâmica do casco, o estado do mar, o vento, a densidade da água, entre outros. Em suma, importa salientar que esta relação, não irá descrever a dinâmica entre a velocidade e potência em cenários cujos fatores externos são significativos.

### 3.6 – Carga auxiliar do navio

Dos registos horários da instrumentação do QEP, encontra-se também disponível a potência produzida de cada grupo eletrogéneo assim como o FP instantâneo, no formato da tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Formato dos registos horários dos parametros dos grupos em comissionamento.

GERADOR 1							
HORA	L1(A)	L2(A)	L3(A)	KW	PF	KVA	KVAR
02:00	395	393	385	276	0,68	400	281
03:00	395	392	376	276	0,66	490	291
04:00	388	386	392	282	0,67	399	287
05:00	360	370	360	250	0,68	390	265

Uma vez mais, não é possível extrair, diretamente, o consumo do Quadro Elétrico Auxiliar (QEA), no entanto, realizando a soma das potências aparentes<sup>5</sup> dos grupos em comissionamento ( $S_{GD}$ ), obtém-se a potência aparente total ( $S_T$ ) no navio, conforme equação 3.6.

$$S_T = S_{GD1} + S_{GD2} + S_{GD3} + S_{GD4} \quad (3.6)$$

Sabendo a velocidade, a potência aparente total e detendo a relação da velocidade do navio em função da potência aparente, torna-se possível obter a potência aparente presente no QEA ( $S_{QEA}$ ), efetuando a subtração da equação 3.7.

$$S_{QEA} = S_T - S_{MEPs} \quad (3.7)$$

---

<sup>5</sup> Importa salientar que apenas foi possível efetuar a soma das potências aparentes, pois foi considerado que tanto os quadros elétrico principal, motores propulsores e auxiliar possuem o mesmo  $\cos(\varphi)$  (coluna FP da tabela 3.4).

### 3.7 – Perfis de utilização

Inicialmente, foi idealizado representar 5 cenários típicos de perfis de utilização do navio, resumidos na tabela 3.5:

Tabela 3.5 – Perfis de utilização do navio e breve descrição.

<b>Perfis</b>	<b>Descrição sucinta</b>
<b>Navegação corrida</b>	<i>Consiste na utilização de um regime constante dos MEP e perfil carga do QEA variável durante o dia. Típico durante um dia de trânsito à velocidade de cruzeiro.</i>
<b>Operações oceanográficas 1</b>	<i>Consiste num perfil de carga dos MEP e QEA variáveis durante o dia. Representa os registos de consumo durante um dia típico de sondagens de profundidade do fundo mar.</i>
<b>Operações oceanográficas 2</b>	<i>Consiste num perfil de carga dos MEP e QEA altamente variáveis durante o dia. Adicionalmente existe um período, das 12h às 23h, em que o navio se encontra fundeado, ou seja, neste período apenas existe consumo do QEA.</i>
<b>Manutenção boias</b>	<i>Consiste num perfil de carga dos MEP e QEA variáveis durante o dia. Representa os registos de consumo durante um dia de manutenções de boias costeiras com períodos de trânsito entre trabalhos.</i>
<b>Dynamic Positioning<sup>6</sup></b>	<i>Consiste num perfil de utilização dos MEP, altamente variável, gerido totalmente por um software de controlo, com um objetivo de manter uma posição rigorosa no mar. Este cenário é fortemente influenciado pelas condições do estado do mar.</i>

#### 3.7.1 – Navegação corrida

Analisando o cenário de navegação corrida, observa-se claramente que não existem, praticamente, alterações no regime dos MEP, conforme figura 3.12. Referente ao QEA, existem pequenas oscilações de cargas durante o dia, possivelmente decorrentes das atividades internas, confeção da alimentação, rotação de equipamentos em funcionamento, entre outros. Neste

<sup>6</sup> Devido a fatores externos, abordados na subsecção 5.2.1, não foi possível representar obter os dados do perfil *Dynamic Positioning*.

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íões de lítio

cenário, tipicamente os grandes consumidores do QEA, encontram-se desligados, nomeadamente os guinchos oceanográficos e impulsores laterais.

De notar que neste cenário foi constatado um FP médio ao longo do dia de 0.72, que apesar de ser um valor caracteristicamente baixo, irá ser o valor mais alto verificado em todos os cenários.

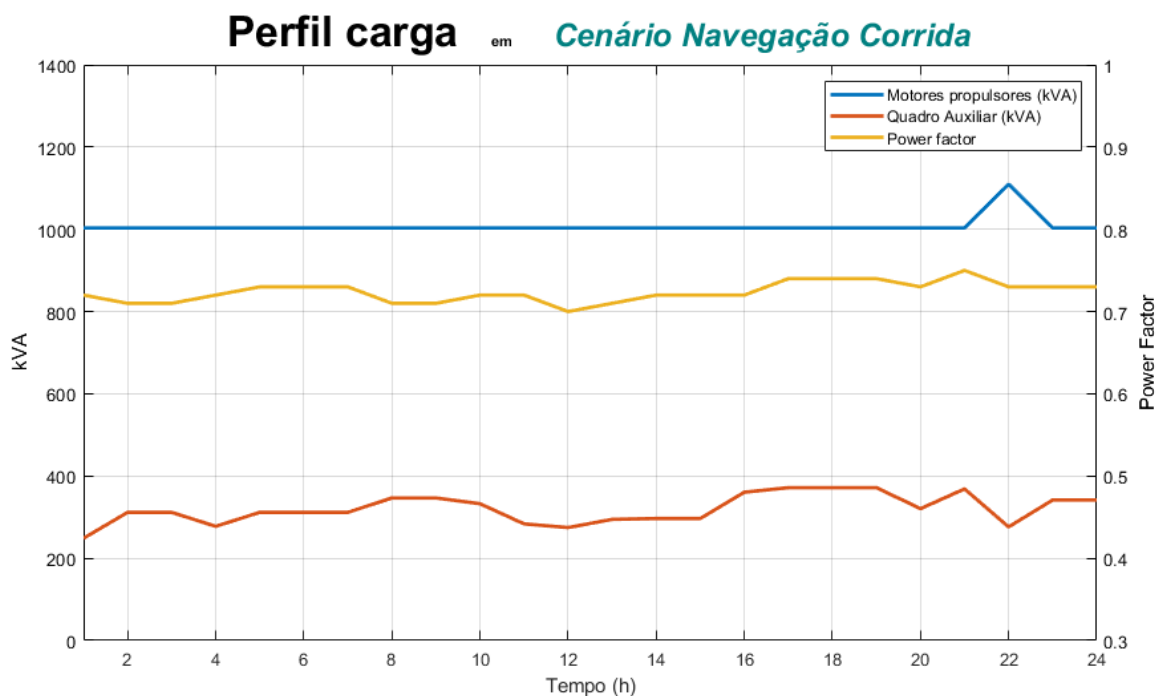


Figura 3.12 - Perfil de carga dos MEP e QEA em cenário de navegação corrida.

### 3.7.2 – Operações oceanográficas 1

Neste perfil de carga, o navio encontra-se a realizar sondagens de profundidade e ocasionais amostragens de água a diferentes profundidades. O navio, neste cenário, utiliza regimes de MEP mais baixos que em navegação a velocidade cruzeiro (figura 3.13). Quanto ao QEA, é notório um maior volume de energia gasto, devido à necessidade de operar outros equipamentos a bordo, tais como guinchos oceanográficos, sondadores de profundidade e impulsores laterais de popa.

O FP neste cenário, de baixo consumo, é notoriamente baixo com um valor médio diário de 0.65, possivelmente devido à tipologia de equipamentos a bordo, fazendo com que, no geral, a carga possa ser vista como predominantemente indutiva [54].

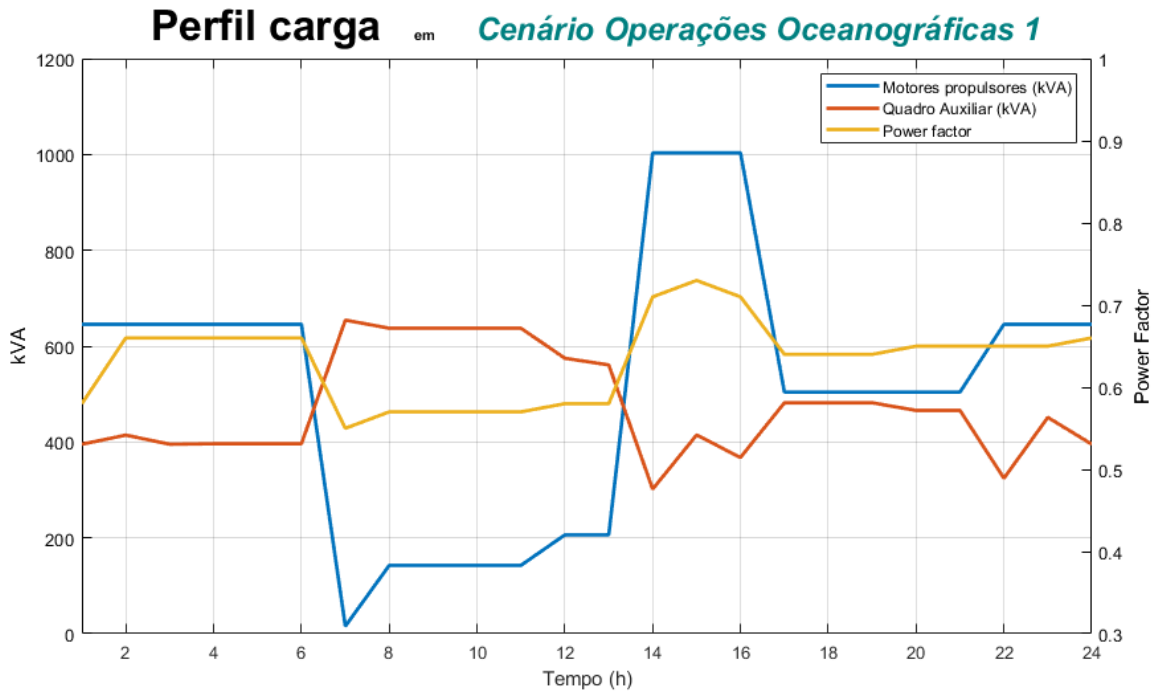


Figura 3.13 - Perfil de carga em cenário de operações oceanográficas 1.

### 3.7.3 – Operações oceanográficas 2

Este cenário de utilização, à semelhança do anterior, contempla um período de sondagens de profundidade (das 01:00 às 11:00). Prosseguido de uma janela temporal em que o navio se encontra fundeado no período das 11:00 até as 23:00. De notar que, neste período os MEP encontram-se parados, ou seja, o perfil de carga é dado apenas pelo QEA, conforme demonstra a figura 3.14.

O FP apresenta um valor médio de 0.65. Tem sido, recorrentemente, observado que os MEP influenciam positivamente o FP, ou seja, quando a carga total do navio provem, maioritariamente, dos MEP, o FP apresenta valores superiores do que no caso inverso.

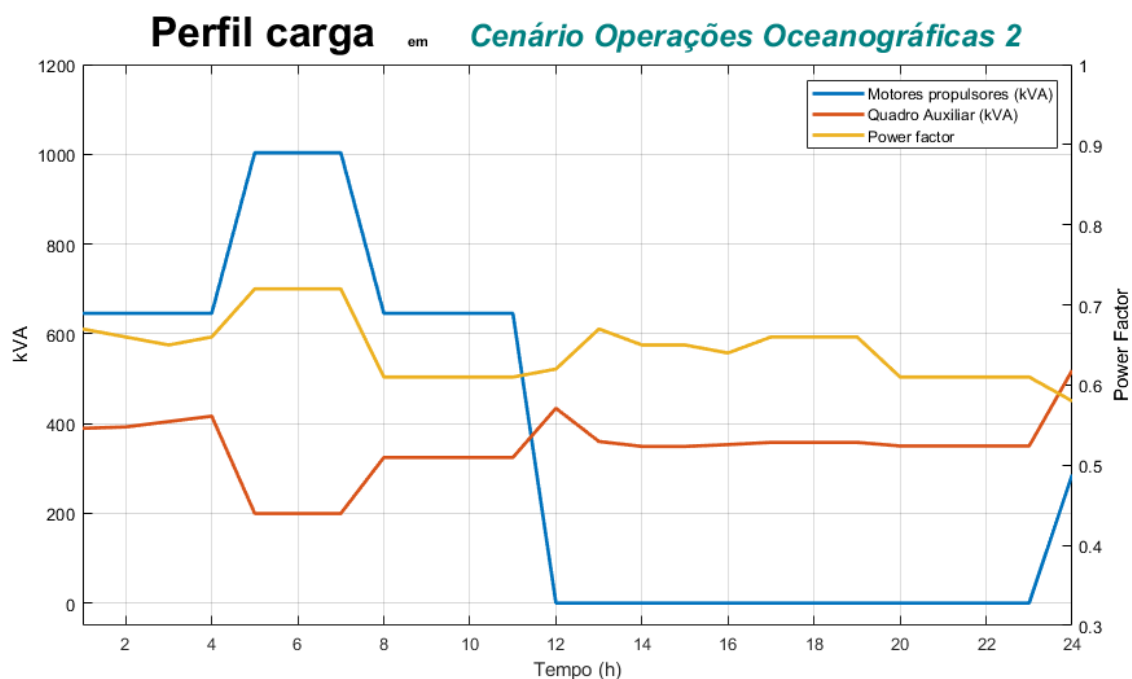


Figura 3.14 - Perfil de carga em cenário de operações oceanográficas 2.

### 3.7.4 – Manutenção de boias

Os trabalhos de manutenções de boias costeiras e oceânicas portuguesas fazem parte dos cenários típicos em que o navio é empregue. A recolha das boias para o convés do navio e realização de manutenção/substituição dos sensores, exigem que o navio se mantenha na mesma posição dinâmica, por vezes, durante horas. Estes trabalhos, por sua vez, necessitam de uma utilização altamente variável dos MEP, conforme constatado na figura 3.15.

Uma vez mais, o FP mantém a tendência de acompanhar o andamento dos MEP, sendo constatados os melhores registos em momentos em que a utilização dos MEP é predominante na carga total do navio.

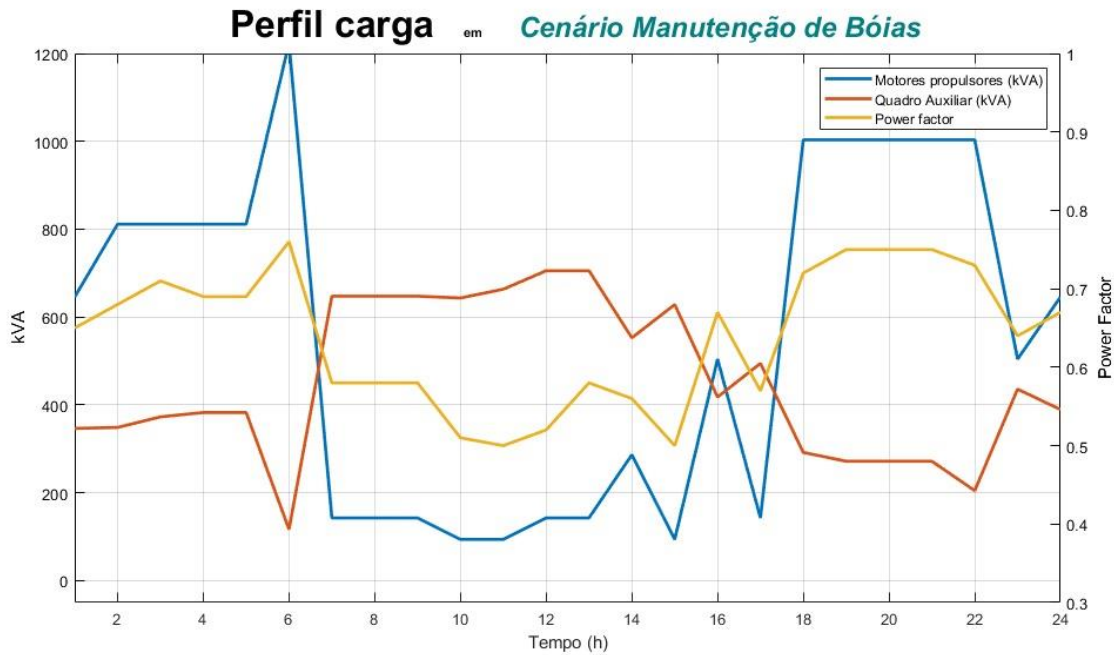


Figura 3.15 - Perfil de carga em cenário de manutenções de bóias.

### 3.7.5 – Análise dos perfis de carga

De um modo geral, efetuando uma análise dos perfis em estudo é possível concluir que os motores propulsores são a componente predominante do navio quando o navio se encontra a navegar sensivelmente acima dos 6 nós de velocidade.

Foi ainda possível confirmar a baixa eficiência energética do navio independente do cenário. Em média, o fator de potência tende a ser inferior a 0.70, o que se traduz numa presença de um volume de potência reativa significativa e não desejável.

Por último, dos dados analisados é possível constatar que quando os motores elétricos funcionam num regime elevado, o FP tem tendência a ser superior. Verificando a figura 3.15, nos períodos das 02:00 às 07:00 e das 18:00 às 22:00, nota-se que os motores propulsores são a carga predominante e que o fator de potência é consideravelmente superior à média do dia. Em suma, pode-se colocar a hipótese que o maior responsável do baixo FP encontra-se no interior do quadro elétrico auxiliar, uma vez que quando este quadro é a carga predominante no navio, o FP tende a ser mais baixo.

## Capítulo 4

# Dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia

Neste capítulo será abordado o dimensionamento do SAE. As escolhas serão fundamentadas pela análise das tecnologias abordadas no capítulo 2.

### 4.1 – Requisitos para o SAE

Por forma a elaborar um apropriado dimensionamento do SAE, é necessário delinear concretamente o seu objetivo e requisitos. Estes requisitos irão conjugar as necessidades energéticas do navio com o propósito deste SAE.

De um modo geral, o objetivo delineado para este SAE é aumentar a eficiência energética global do navio. A adição dum SAE em modo de funcionamento híbrido com os grupos eletrogéneos, permite ao navio a capacidade de navegação puramente elétrica. Os requisitos específicos encontram-se descritos mais pormenorizadamente na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Detalhes dos requisitos do SAE.

Requisitos	Observações
<i>Armazenamento de energia mínima equivalente a um grupo eletrogéneo em funcionamento durante 1h a 100% de capacidade (650kVA).</i>	650 kWh
<i>Armazenamento de energia suficiente para trajeto Porto de Lisboa em modo elétrico</i>	1.3 MWh
<i>Potência máxima de descarga (valor mínimo)</i>	650 kW
<i>Tensão nominal de saída</i>	600V rms ph-ph
<i>Frequência da tensão</i>	57-62 Hz
<i>Tempo de comutação entre carga e descarga</i>	100 ms

Os requisitos descritos na tabela 4.1, apesar de serem bastante específicos para esta instalação, vão de encontro às especificações de algumas das ofertas disponíveis no mercado para bancos de baterias de íões de lítio de 2 MWh de capacidade [55], [56].

Tendo em conta os requisitos definidos anteriormente, efetuou-se uma pesquisa no mercado para encontrar um SAE com parametrização estandardizada e passível de instalação num navio. A solução encontrada é do fabricante *ESS* e contempla um conversor bidirecional, BMS e construção modular contentorizada. As especificações desta solução, descritas na figura 4.1, serão usadas como referência no modelo deste trabalho.

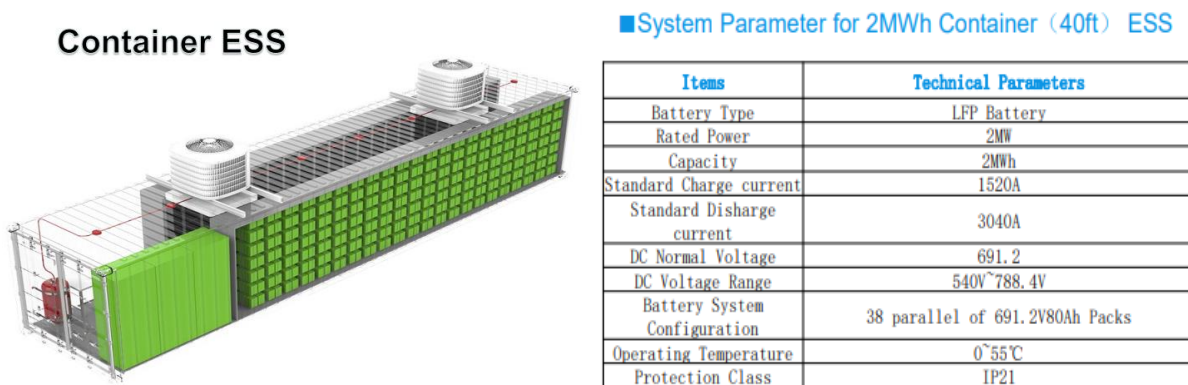


Figura 4.1 - À esquerda exemplo contentorizado do SAE e à direita as especificações gerais do SAE fabricado pela marca ESS [76].

O facto de existirem soluções no mercado que vão de encontro aos requisitos deste projeto, faz com que os preços destes SAE sejam mais competitivos e exequíveis.

#### 4.1.1 – Tipologia a utilizar

Dos casos de estudo abordados no capítulo 2, conclui-se que os projetos atuais de eletrificação de navios [57] têm vindo a utilizar bancos de baterias de íões de lítio.

O facto deste tipo de armazenamento encontrar-se, vastamente, documentado, a utilização global no setor dos transportes e constante decréscimo no preço por kWh [35], tornam esta tipologia uma aposta consensual na atualidade.

## **4.2 – Energia**

A energia total armazenada foi fixada em 2 MWh, esta escolha provém de dois fatores, sendo um deles a capacidade de realizar reserva energética, e o segundo dar a capacidade de efetuar o trajeto do porto de Lisboa até à base Naval do Alfeite em modo completamente elétrico (tópico abordado no subcapítulo 4.2.1(c)).

Ao nível da reserva energética, por experiência própria de trabalho com os grupos eletrogéneos a bordo do navio em estudo, estes necessitam de aproximadamente 45 minutos a 1 hora para criar as condições necessárias (atingir as temperaturas de trabalho), para colocá-los em funcionamento de um modo seguro e não degradante para o material. Portanto, o SAE será dimensionado por forma a que este consiga substituir um grupo eletrogéneo durante o tempo necessário, para o comissionar em segurança.

Por conseguinte, o SAE dimensionado irá permitir ao navio eliminar um grupo eletrogéneo, o que apenas efetua a reserva energética, ficando esta função a cargo SAE.

### **4.2.1 – Autonomia**

Nesta secção serão abordados os valores expectáveis de autonomia, em modo completamente elétrico, com o SAE dimensionado de acordo com a tabela 4.1, em diferentes cenários de empenhamento. Para todos os cenários é considerado que o SoC, do SAE, se encontra a 90% e que este nunca deve baixar dos 20%, ou seja o *Depth of Discharge* (DoD) máximo de 70%.

#### **4.2.1.1 – Navio atracado**

O caso de navio atracado é o cenário cujo consumo energético do navio é menor. O consumo do navio provém essencialmente de sistemas vitais tais como: ar condicionados, bombas de circulação de água, guias, pré aquecedores de óleo dos grupos eletrogéneos, cozinha e rede de lazer. Analisando registos de consumo energético de bordo, neste cenário, a potência instantânea aparente do navio tende a oscilar entre os valores de 80 a 140 kVA. Assim sendo, foi assumido uma potência média aparente de 110 kVA, no caso de navio atracado. Neste cenário é expectável que o navio tenha uma autonomia (apenas elétrico) de 12 horas e 44 minutos.

### 4.2.1.2 – Autonomia em função da velocidade (gráfico)

Para estimar a autonomia que o navio poderá ter em navegação corrida a diferentes velocidades (tabela 4.2), foi utilizada a equação 3.4 como referência que demonstra a relação entre velocidade e potência aparente dos MEP. De notar que, existem inúmeros fatores externos que podem influenciar a potência necessária para realizar determinada velocidade, tais como intensidade do vento, estado do mar, densidade da água, que não foram tidos em conta neste trabalho.

À potência aparente dos MEP ( $S_P$ ) é adicionado a potência aparente necessária para manter o funcionamento dos equipamentos vitais do navio ( $S_V$ ) no valor médio de 300 kVA<sup>7</sup>. Sendo o somatório das potências aparentes ( $S_T$ ) a bordo dada pela equação 4.1.

$$S_T = S_P + S_V \tag{4.1}$$

Tabela 4.2 - Autonomia em tempo e distância em função da velocidade do navio

Velocidade (kt)	Autonomia (h:m)	Autonomia (milhas náuticas (NM))
3	4h 12m	12.61 NM
4	3h 42m	14.81 NM
5	3h 06m	15.52 NM
6	2h 29m	14.95 NM
7	1h 57m	13.70 NM
8	1h 31m	12.17 NM
9	1h 11m	10.65 NM

<sup>7</sup> Valor médio registado em cenário de navegação a velocidade cruzeiro.

### 4.2.1.3 – Autonomia em percursos nos Portos de Lisboa e Setúbal

Utilizando os valores da tabela 4.2, que relaciona a autonomia, em modo elétrico, com a velocidade praticada pelo navio é possível estimar se este SAE terá utilidade em tornar o navio completamente elétrico para a realização dos percursos nos portos mais comuns.

Para este exercício, o SoC inicial será fixo em 90% e não deve baixar dos 20% de (ou DoD = 70%) e estimar se é possível efetuar o trajeto em modo elétrico a uma velocidade fixada em 6 kt.

Na figura 4.2 apresenta-se o percurso típico do Porto de Lisboa com destino à Base Naval de Lisboa (BNL), que possui, aproximadamente, 23.65 km (14.69 NM) de extensão. Para realizar este percurso, é estimado que seja necessária uma energia aparente total de 1375.96 kVAh. Com o SAE dimensionado, tem-se disponível uma “energia útil” (DoD = 70%) de 1.4 MWh. Subtraindo a energia estimada para este percurso à energia útil do SAE, conclui-se que é possível realizá-lo em modo completamente elétrico.

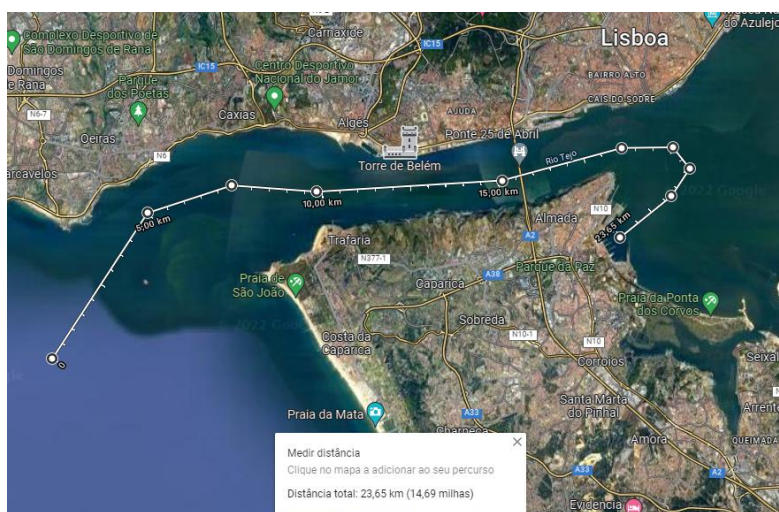


Figura 4.2 - Percurso do porto de Lisboa até à BNL, utilizando a ferramenta de medição de distâncias do *Google Maps*.

Para este percurso é estimado um DoD = 68.80%, ou seja, assumindo o SoC inicial de 90% é previsto que o SoC no final do trajeto seja de aproximadamente 21.20 %.

Analisando o percurso do Porto de Setúbal até ao Ponto de Apoio Naval de Troia, o mesmo tem aproximadamente 12.96 km (7 NM) de extensão, conforme figura 4.3.

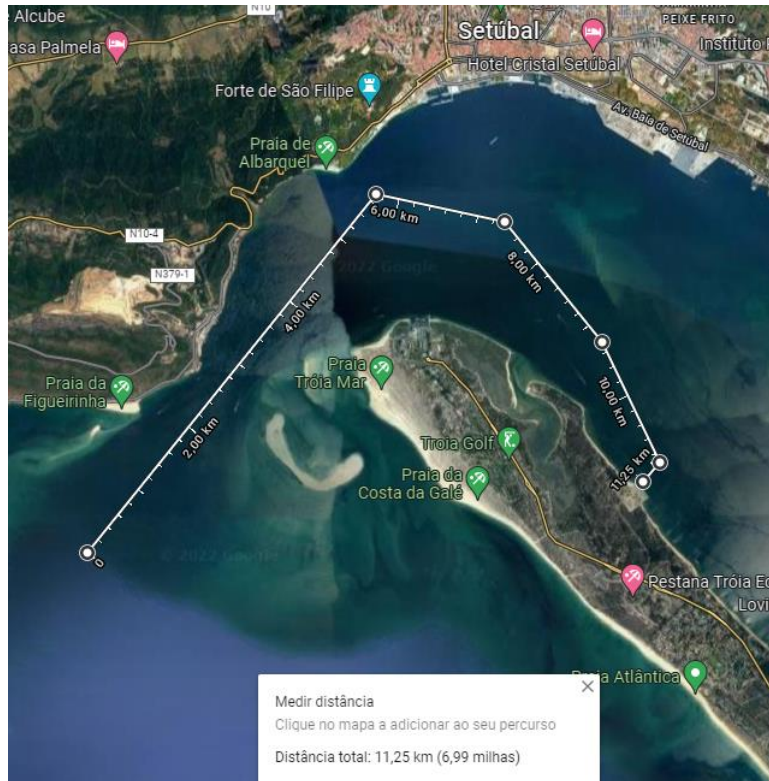


Figura 4.3 - Percurso do Porto de Setúbal até o Ponto de Apoio Naval de Troia, utilizando a ferramenta de medição de distâncias do *Google Maps*.

Para este trajeto, é expectável uma energia necessária de 655.67 kWh. Realizando os mesmos cálculos que anteriormente, constatamos que, facilmente, é possível realizar o percurso do Porto de Setúbal em modo completamente elétrico. Sendo expectável um DoD = 28.1 % e um SoC final de 61.9 %.

#### 4.2.1.4 – Autonomia em manobras de atracação

Por forma a estimar a autonomia durante as manobras de atracação do navio, usaram-se ciclos de 10 segundos, conforme a figura 4.4. Este ciclo pretende simular algumas das ordens típicas na propulsão durante as manobras de atracação. O ciclo é constituído por duas ordens de carácter agressivo nos MEP (em,  $t(s) = [22,25] \cap [28,30]$ ) que se traduzem em grandes oscilações de carga) e, adicionalmente, uma manobra de ajuste na intensidade dos propulsores em  $t(s) = 27$ .

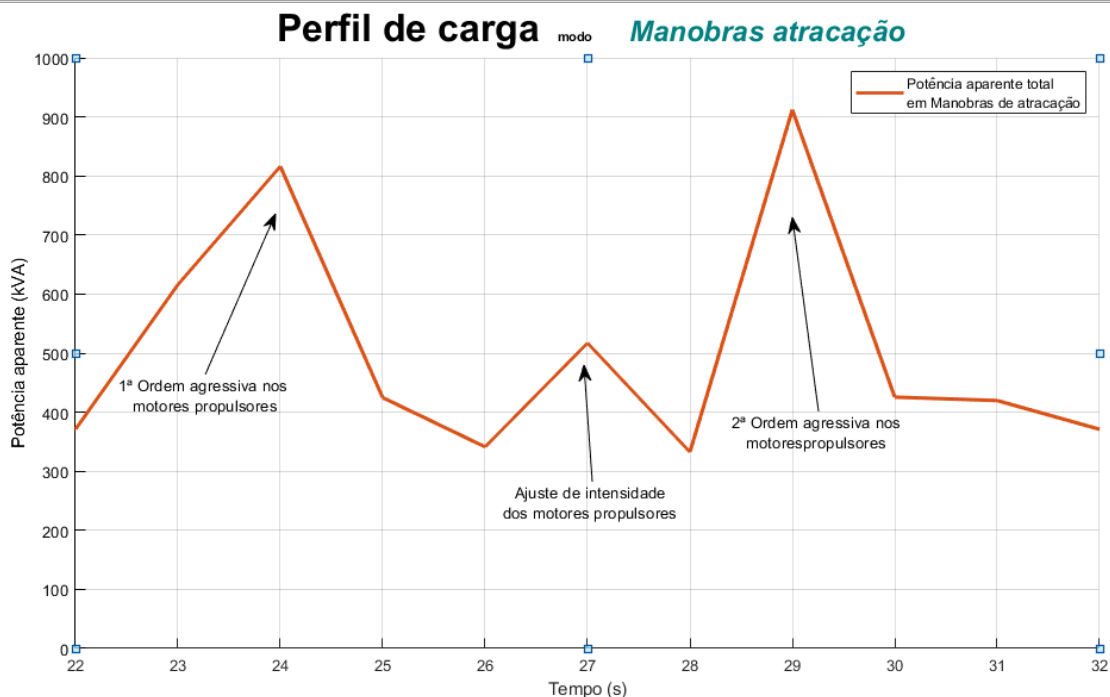


Figura 4.4 - Ciclo de 10 segundos constituídos por duas ordens bruscas nos propulsores.

O ciclo representado na figura 4.4 será repetido 60 vezes (equivalente a 10 minutos de manobras) e será analisado o DoD do SAE (SoC inicial igual a 90%). A partir do DoD, verificado em 10 minutos de manobras, será extrapolado o número de manobras dos propulsores até o SAE atingir o SoC mínimo de 20%.

Analisando os dados da figura 4.5 observa-se um DoD de 3.47% durante 10 minutos. Extrapolando estes dados até o SoC obter o valor mínimo de 20%, estima-se que o navio, em modo elétrico, tenha capacidade de efetuar 3 horas e 22 minutos de manobras de atracação ou o equivalente a 2420 manobras “bruscas” nos propulsores.

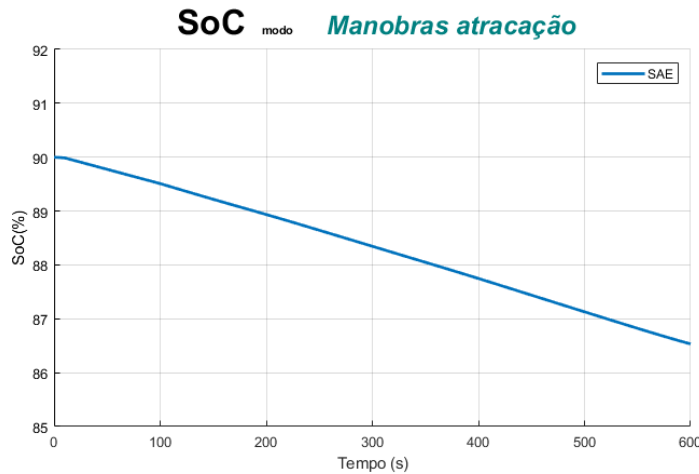


Figura 4.5 – SoC (%) do SAE em função do tempo (s) em manobras de atracação, repetindo o ciclo de 10 segundos durante 10 minutos.

### 4.3 – Cenários para carregamento

O cenário de carregamento do SAE proposto consiste em aproveitar os momentos em que existe menos demanda de potência no navio. Cenários como o caso de navio fundeado, pairar ou até mesmo atracado quando a fonte de energia é de bordo.

Neste trabalho será utilizada a convenção de que corrente com sinal positivo, significa que o SAE se encontra a “fornecer” energia à rede (descarregamento) e que o sinal negativo expressa que o SAE está a “receber” energia da rede (carregamento).

Em momentos em que a potência na rede baixa do limite inferior de eficiência dos grupos eletrogêneos (67% da capacidade total), o algoritmo fixa o funcionamento do grupo no ponto de eficiência máxima dos geradores (75% da capacidade total), fazendo com que exista um excesso de potência comparativamente à carga (ver figura 4.6). Este excesso de potência produzida é utilizado para fornecer corrente ao SAE.

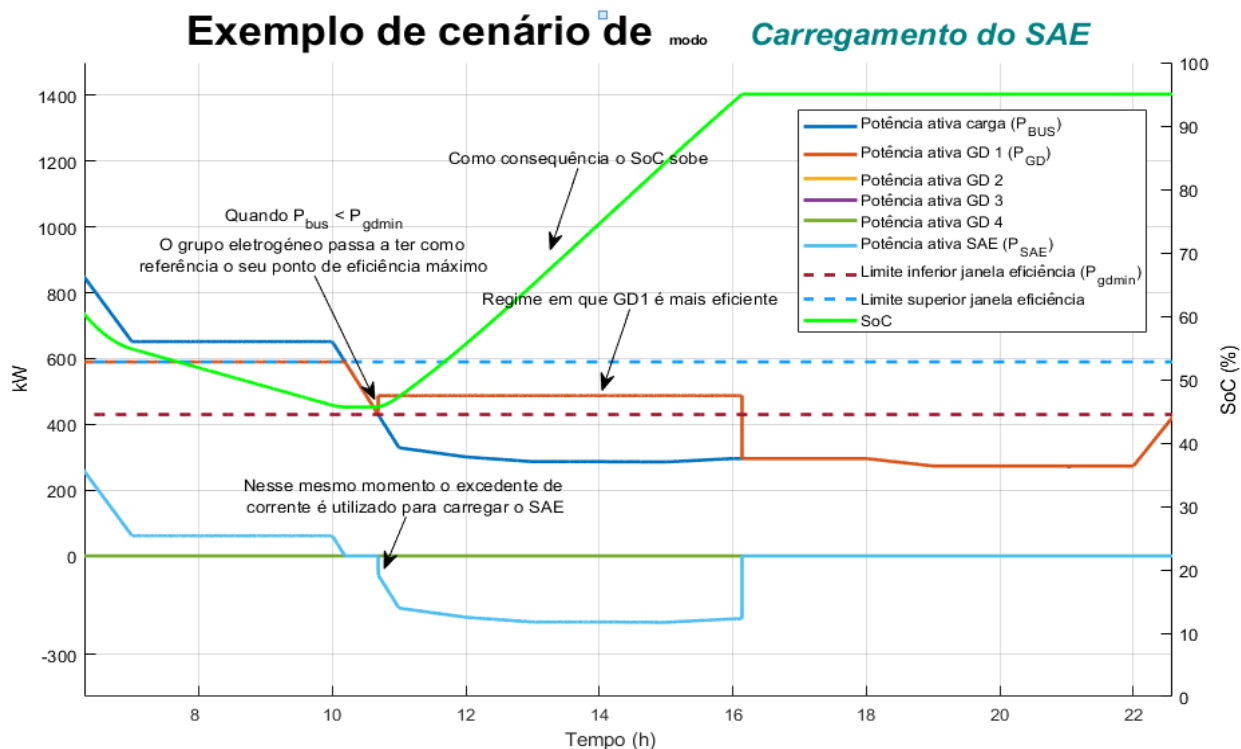


Figura 4.6 – Cenário de carregamento do SAE.

Em suma, em momentos em que a potência na rede é de tal forma baixa que não é possível colocar os grupos na janela de eficiência ótima, o excesso de corrente é utilizado para carregar o SAE.

Da figura 4.6 importa ainda realçar que como os grupos eletrogéneos funcionam em regime equilibrado, as curvas de potência dos grupos encontram-se sobrepostas. Para saber o número de grupos comissionados em cada momento teremos que verificar a cor da curva, ou seja, como no período das 10:20 às 22:20 visualizamos a cor laranja (cor da curva de potência do GD1) constatamos que existe 1 grupo comissionado<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Por conseguinte, caso a cor da curva de potência fosse roxa (curva de potência do GD3), estariam 3 grupos comissionados em simultâneo.



## Capítulo 5

### Modelização

#### 5.1 – Visão geral

Neste subcapítulo será descrito o procedimento utilizado, por forma a quantificar os potenciais benefícios na eficiência energética, com a implementação de um SAE em paralelo com o sistema de geração de energia atual no navio.

Foi elaborado um modelo em *software Matlab Simulink*, que irá permitir simular o navio em estudo, utilizando diferentes modos energéticos (modo híbrido, modo elétrico e apenas usando os grupos de combustão interna) e em diferentes cenários de aplicação.

A visão geral da simulação (figura 5.1), é constituída por diversas áreas com funções específicas, nomeadamente: um painel de controlo interativo, grupos eletrogéneos, banco de baterias de íões de lítio, a carga do navio e uma área com a instrumentação da rede (BUS).

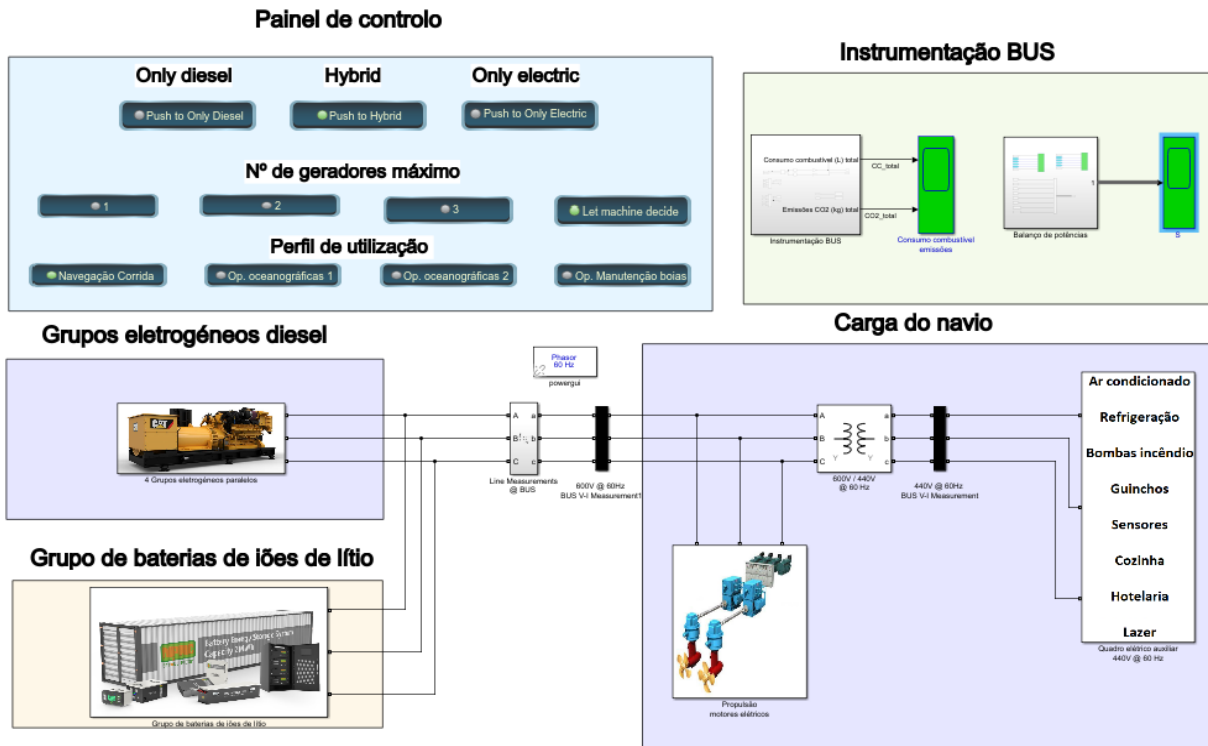


Figura 5.1 – Visão geral do modelo.

## 5.2 – Modelo

### 5.2.1 – Considerações prévias

É importante interiorizar que apesar da simulação tentar representar o caso real, existem sempre fatores que não foram considerados, por forma a manter o espetro do estudo proposto neste trabalho e a simplicidade da simulação.

Numa fase inicial deste trabalho, de modo a modelizar os grupos eletrogéneos foram usados os blocos *Generic Engine*, diretamente acoplado a uma *Synchronous Machine*, no entanto, com o escalar para quatro grupos eletrogéneos e aumento da complexidade do modelo, a simulação tornou-se demasiado instável e lenta para simular períodos de 24 horas. Para colmatar este facto, substituíram-se esses blocos por fontes de tensão trifásicas ideais. Esta situação não é a ideal, pois na simulação final não vai ser possível verificar dinâmica a que um motor desta dimensão reage a variações de carga. Adicionalmente, será expectável que nas simulações finais seja

verificado que os grupos eletrogéneos reajam mais rapidamente a variações de carga do que o próprio SAE, quando num caso real o caso contrário seria o expectável.

Importa ressaltar que, inicialmente foi pressuposto o acesso aos dados de consumo energético do navio em estudo. No entanto, por questões administrativas não foi possível extrair os dados energéticos do navio do *software* da gestão da plataforma. Os dados armazenados no *software* são amostrados a uma frequência muito superior e são todos registados, em simultâneo, enquanto os registos horários possuem um erro inerente ao fator humano aquando leitura de sensores analógicos e incapacidade de registar todos os valores em simultâneo (ou seja, o último dado a ser registado difere em alguns segundos do primeiro dado registado). Assim sendo, a forma possível de obter perfis de utilização do navio foi a partir dos registos horários do diário de navegação e da instalação elétrica de bordo em diferentes cenários. O racional por de trás do uso destes dados, é que sabendo a potência máxima que os motores elétricos produzem, a velocidade máxima do navio, e a relação entre estes dois seria possível extrapolar a potência necessária para o navio realizar determinada velocidade (equação 3.4). Mais uma vez, não é o caso ideal, pois acarreta uma margem de erro considerável, no entanto, permitiu prosseguir com o estudo proposto.

Um outro pressuposto deste modelo é que este funciona com equilíbrio de fases e equilíbrio de carga entre grupos eletrogéneos. Este será o cenário ideal, no entanto, não corresponde exatamente à realidade, pois existe sempre um desequilíbrio entre fases. Em suma, devido a esta simplificação, como são usadas cargas equilibradas, basta analisar uma das fases, pois as restantes irão possuir os mesmos parâmetros. O mesmo acontece com a instrumentação dos grupos eletrogéneos, isto é, desde que os grupos estejam em comissionamento os parâmetros tendem a estabilizar no mesmo valor entre eles.

Por último, o impacto que a massa associada a um SAE possui, com uma energia armazenada igual a 2 MWh, não pode ser desprezada. Do que foi possível apurar, das ofertas em 2022 desta tipologia de SAE com uma energia armazenada de 2.5 MWh, é expectável que um sistema completo destes (incluindo contentorização, BMS, eletrónica de controlo e ventilação do compartimento) tenha uma massa de aproximadamente 22 toneladas. Mesmo utilizando tecnologias disruptivas no setor, como é o caso das células de íões de lítio da empresa *Amprius*, que anunciam uma densidade energética de 450 Wh/kg [58], será expectável uma massa nunca inferior a 4.4 t (valor de massa excluindo contentorização e eletrónica de controlo). Isto para referir que de acordo com a Equação 5.1 [53] a massa tem impacto no coeficiente de atrito do

navio, pois a linha de água do navio sobe, o que inevitavelmente fará com que a área submersa do navio seja maior.

$$C_t = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2} \quad (5.1)$$

Em que  $C_t$  representa o coeficiente total de resistência do casco,  $R_T$  a resistência total do casco,  $A$  a área submersa do navio e  $V$  a velocidade do navio. Este aumento do coeficiente de atrito do navio não foi considerado nas simulações. Uma das opções para mitigar o aumento do coeficiente de atrito, seria a redução do volume total de combustível a bordo, visto o sistema híbrido proposto acarretar um aumento da eficiência energética.

### 5.2.2 – Painel de Controlo

Com o intuito de evitar a necessidade de múltiplos modelos (um para cada cenário ou modo de funcionamento), foi elaborado um único modelo que permite simular o navio em diferentes cenários e modos de funcionamento (apenas grupos diesel, híbrido e totalmente elétrico). Para tornar isto possível, foi necessário criar um painel de controlo interativo com o utilizador, para permitir a alteração dos parâmetros do modelo (ver figura 5.2).

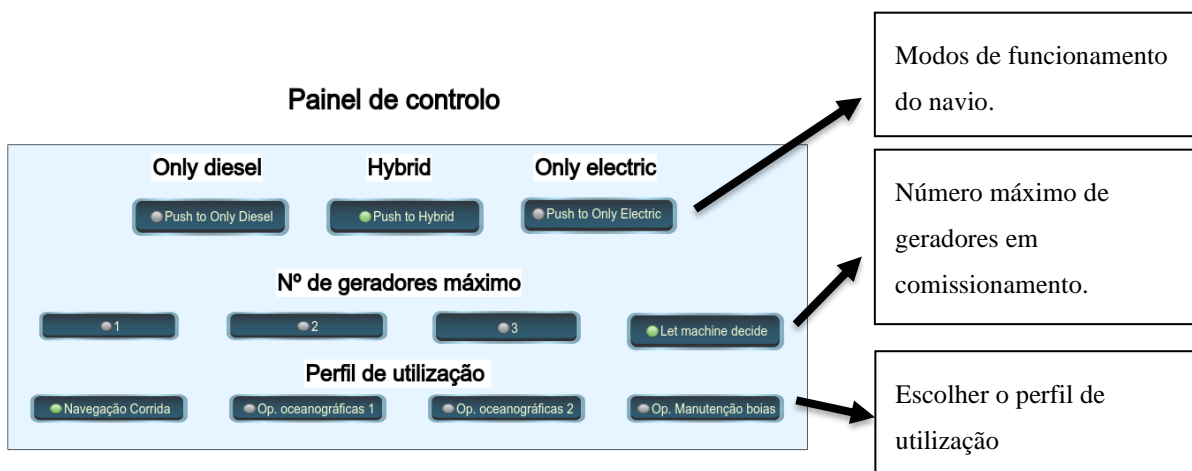


Figura 5.2 - Painel de controlo interativo.

A primeira linha do painel de controlo, destina-se escolher o modo em que modelo do navio irá funcionar, nomeadamente:

- **Modo *Only Diesel*** – Será simulado o funcionamento do navio, apenas com os geradores diesel, sem recurso ao SAE;
- **Modo *Hybrid*** – Será simulado o funcionamento do navio em modo híbrido proposto neste trabalho em que o SAE irá “auxiliar” nos momentos em que os geradores diesel sejam menos eficientes;
- **Modo *Only Electric*** – Será simulado o funcionamento do navio exclusivamente com energia proveniente do SAE. Este modo foi utilizado essencialmente para extrair dos dados de autonomia do navio (tópico abordado subcapítulo 4.2).

A segunda linha do painel, permite ao utilizador optar pelo número máximo de geradores que a simulação irá utilizar. Isto irá permitir simular casos específicos, como é o caso da gestão das manobras de atracação e operações oceanográficas, no modo *only diesel*. Nesta área do painel, o utilizador pode optar por:

- **Número de geradores máximo = 1,2 ou 3** – Limita o número máximo de geradores que poderão funcionar em simultâneo naquela simulação;
- ***Let machine decide*** – Este modo não restringe o navio no número máximo de geradores em uso e por este motivo será o modo mais utilizado.

Por forma a seleccionar um funcionamento específico da simulação, em qualquer das linhas terá de ter uma das opções seleccionadas. A combinação de opções possíveis de modos de funcionamento da simulação é dada pela tabela 5.1.

A terceira e última linha do painel, permite escolher um de quatro perfis de utilização do navio. Consoante a escolha, os dados de consumo, tanto dos MEP como do QEA do navio, irão alterar. Os quatro perfis seleccionáveis são:

- Navegação corrida;
- Operações oceanográficas 1;
- Operações oceanográficas 2;
- Operações de manutenções de boias.

Tabela 5.1 - Modos de funcionamento possíveis no modelo *Matlab Simulink*.

<b>Modo de Funcionamento</b>	<b>Número máximo de geradores</b>	<b>Explicação</b>
<i>Only Diesel</i>	<i>1, 2 ou 3</i>	<i>Apenas grupos diesel, restrito ao número máximo de grupos em funcionamento simultâneo e sem utilização do SAE</i>
<i>Only Diesel</i>	<i>Let machine decide</i>	<i>Apenas grupos diesel. Gestão de comissionamento dos grupos conforme caso real do navio, de acordo com figura 3.2.</i>
<i>Hybrid</i>	<i>1, 2 ou 3</i>	<i>Combinação dos grupos diesel e SAE. Gestão conforme proposta na figura 3.5. Limitado ao número máximo de grupos em funcionamento em simultâneo.</i>
<i>Hybrid</i>	<i>Let machine decide</i>	<i>Combinação dos grupos diesel e SAE. Conforme gestão proposta na figura 3.5.</i>
<i>Only Electric</i>	<i>Let machine decide</i>	<i>Modo apenas elétrico.<sup>9</sup></i>

### 5.2.3 – Grupos produtores de energia e consumo de combustível

A instalação atual do navio possui quatro geradores diesel em funcionamento paralelo, que alimentam o barramento principal de 600Vrms ph-ph a 60 Hz. No “interior “de cada grupo, encontramos 3 áreas distintas, conforme figura 5.3:

- Controlo do disjuntor – Programação que decide o comissionamento dos grupos;
- Grupo eletrogéneo + disjuntor programável;
- Instrumentação do grupo eletrogéneo.

<sup>9</sup> O modo *Only Electric* não é afetado pela opção do número máximo de geradores.

# Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

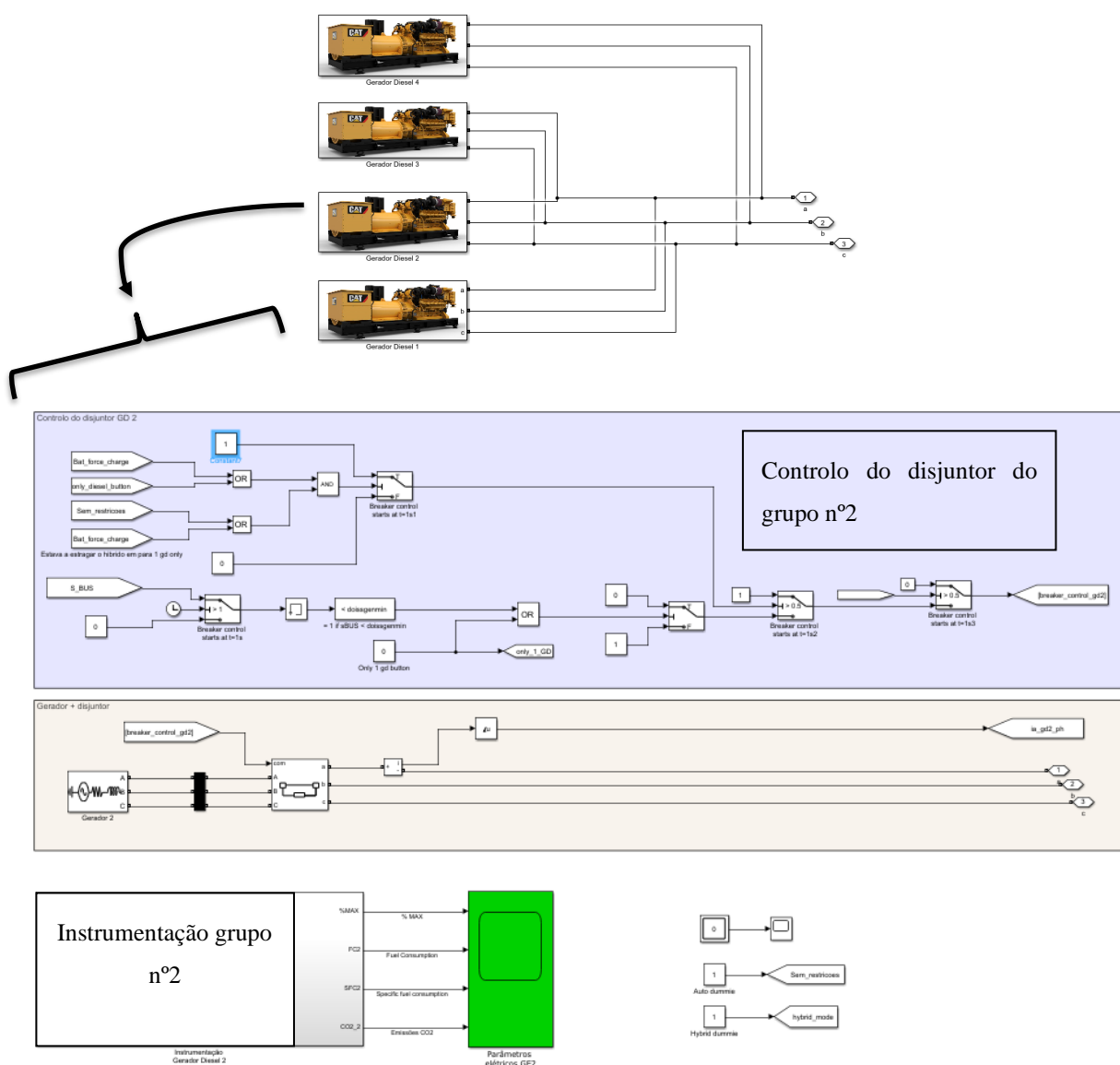


Figura 5.3 - Exemplo do interior do subsistema do grupo eletrogénico nº2.

De uma forma geral, cada grupo tem uma área de programação da gestão do disjuntor (exemplo: “Controlo do disjuntor nº2”). O controlo de cada disjuntor é diferente em cada grupo e foi elaborado para gerir o comissionamento de grupos, que tem como base a potência no barramento principal. Em suma, a programação do controlo do disjuntor é a execução da gestão de comissionamento definido nas figuras 3.2 e 3.5, consoante o modo escolhido de simulação (apenas MCI ou híbrido).

Os subsistemas “Instrumentação”, são semelhantes entre grupos e têm como função realizar o cálculo de potência de saída de cada grupo. Para realizar este cálculo, utilizou-se o bloco *Power (3ph, Phasor)*, que necessita de leituras de tensão e corrente trifásicas como *input*. A saída deste

bloco são a potência ativa e reativa. O cálculo da potência aparente poderia ser realizado da forma tradicional, utilizando o triângulo das potências, conforme equação 5.2:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (5.2)$$

No entanto, aproveitando o facto da simulação estar a funcionar em modo *Phasor*, é possível realizar a manipulação demonstrada na figura 5.4, dentro da área roxa, e obter o mesmo resultado de uma forma mais simples.

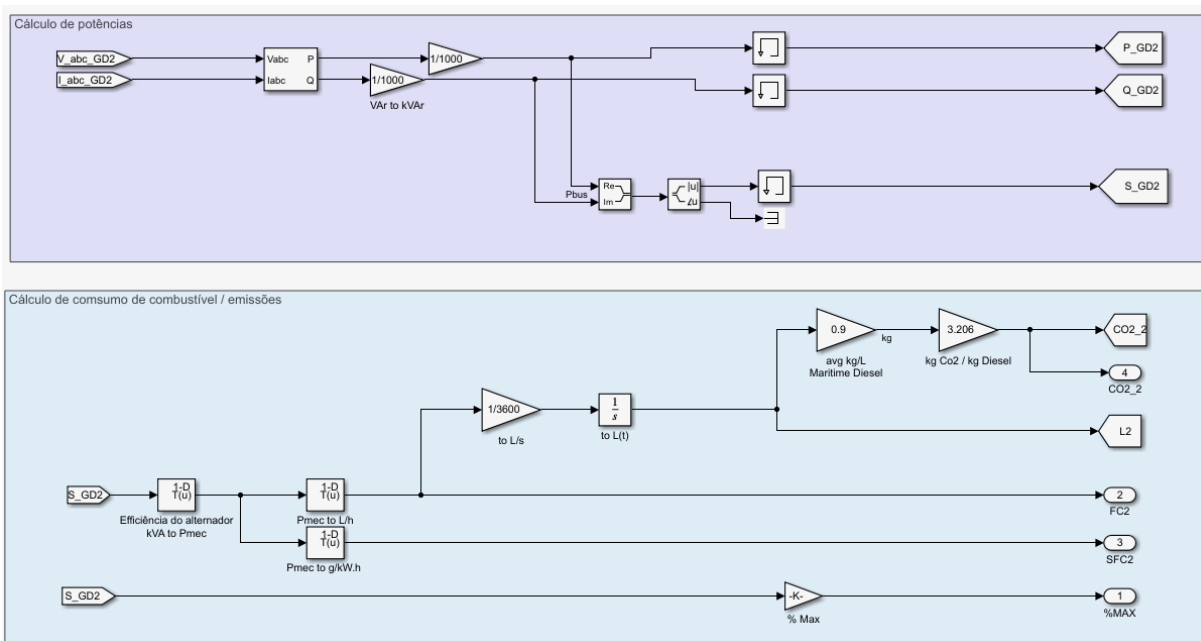


Figura 5.4- Subsistema Instrumentação.

A área azul da figura 5.4, tem como objetivo extrair os dados de consumo de combustível e emissões de  $CO_2$ . Com os dados de consumo de combustível por percentagem de carga (tabela 3.1) e potência aparente instantânea de que o gerador está a fornecer ao barramento principal, é possível estimar o consumo de combustível instantâneo através da potência mecânica aplicada ao veio do motor (aplicando o coeficiente de eficiência da conversão energética do gerador da figura 5.5). Integrando o valor de combustível instantâneo no período temporal da simulação obtém-se o volume total de combustível.

Para extrair os dados referidos, existe a necessidade de usar a potência mecânica no veio à saída do motor, valor que não foi possível obter devido ao modelo utilizado (que assume uma eficiência entre motor e gerador igual a 1). No entanto, sabendo a tipologia do gerador (máquina

síncrona de aplicação marítima) acoplado diretamente ao veio do motor, é possível estimar a eficiência da conversão energética de acordo com a figura 5.5 [59].

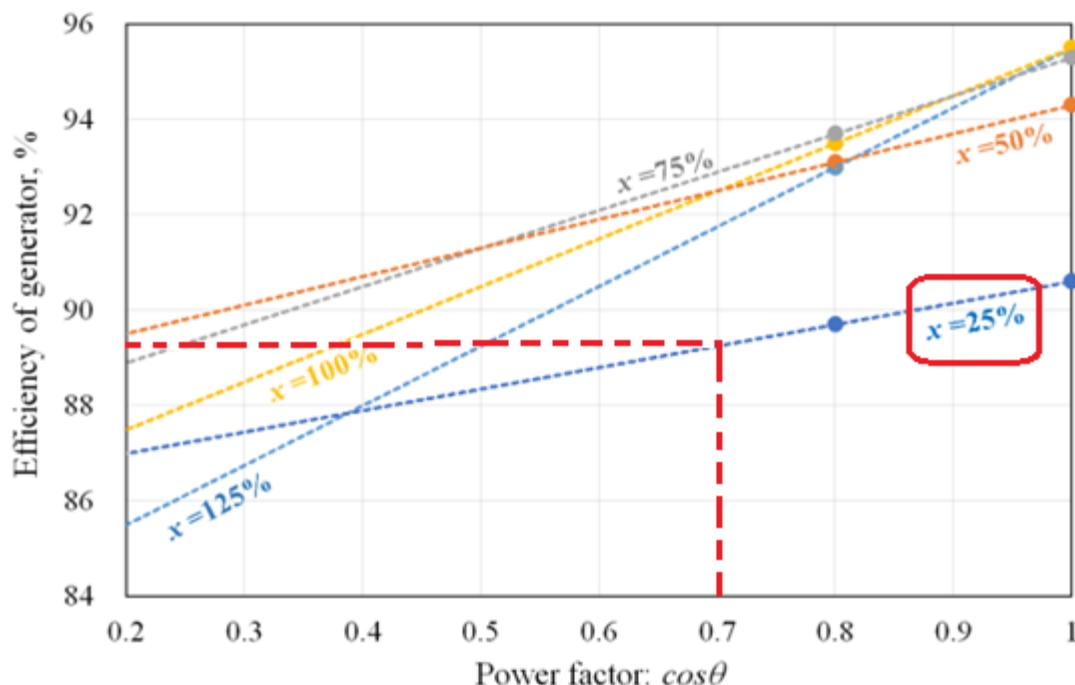


Figura 5.5 - Mapa de eficiência da conversão energética de um gerador síncrono utilizando uma aproximação linear durante testes. Cortesia de H. Kifune et al em [59].

Assim sendo, sabendo a potência aparente à saída do gerador e utilizando o mapa da figura 5.5, fixo num FP, é possível estimar com maior rigor a potência mecânica no veio à saída do motor<sup>10</sup>.

Adicionalmente, sabendo o volume de combustível gasto para determinado período é possível extrapolar as emissões de  $CO_2$  equivalentes. Utilizando as normas definidas pela UE [60], a monitorização das emissões de  $CO_2$  é realizada em dois passos:

<sup>10</sup> Durante as simulações, no modo *Only Diesel*, foram observados FP entre 0.60 e 0.80, no entanto, por forma simplificar o cálculo da potência mecânica foi assumido  $FP = 0.7$ . No modo *Hybrid* foi utilizado  $FP = 1$ .

- Multiplicação entre o volume de combustível consumido e a densidade do combustível (facultado pelo fornecedor de combustível ou por laboratórios autorizados) por forma a obter a massa de combustível consumida;
- Multiplicação entre a massa de combustível consumida e o fator de emissão do respetivo combustível, conforme dado pela tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Fatores de emissão de  $\text{CO}_2$  por tipo de combustível.

Tipo de combustível	Referência	Fator de emissão (t-CO <sub>2</sub> /t-combustível)
1. Diesel/gasóleo	Categorias DMX a DMB da ISO 8217	3,206
2. Fuelóleo leve (LFO)	Categorias RMA a RMD da ISO 8217	3,151
3. Fuelóleo pesado (HFO)	Categorias RME a RMK da ISO 8217	3,114
4. Gás de petróleo liquefeito (GPL)	Propano	3,000
	Butano	3,030
5. Gás natural liquefeito (GNL)		2,750
6. Metanol		1,375
7. Etanol		1,913

### 5.2.4 – Grupo de baterias de íões de lítio

No interior deste subsistema encontramos 5 áreas com propósitos distintos (ver figura 5.6).

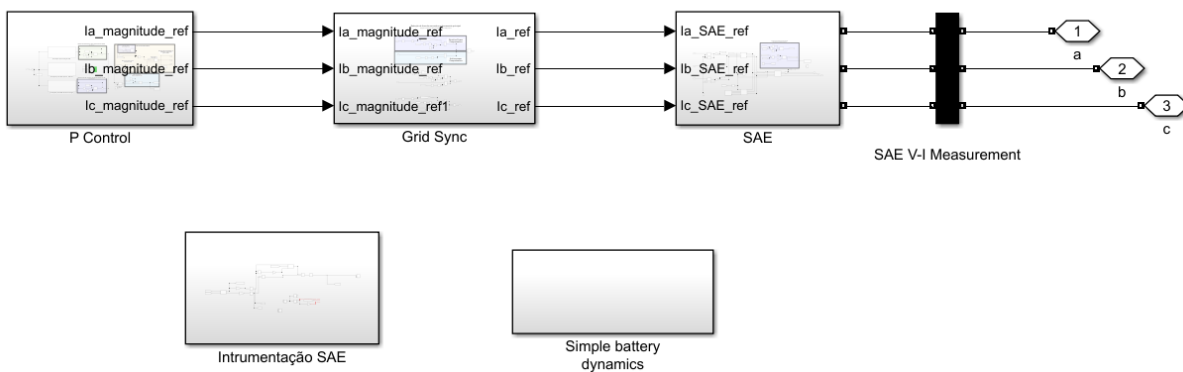


Figura 5.6 - Interior do subsistema Grupo de baterias de íões de lítio.

### 5.2.4.1 – P Control

No interior da área *P Control*, na figura 5.6, reside a programação do modo de funcionamento híbrido do modelo, assim como o controlo do SAE na medida em que é definida a quantidade de corrente usada para carregar/descarregar.

Por forma a facilitar a compreensão do funcionamento do algoritmo que comanda e controla o SAE, propõe-se o fluxograma da figura 5.7.

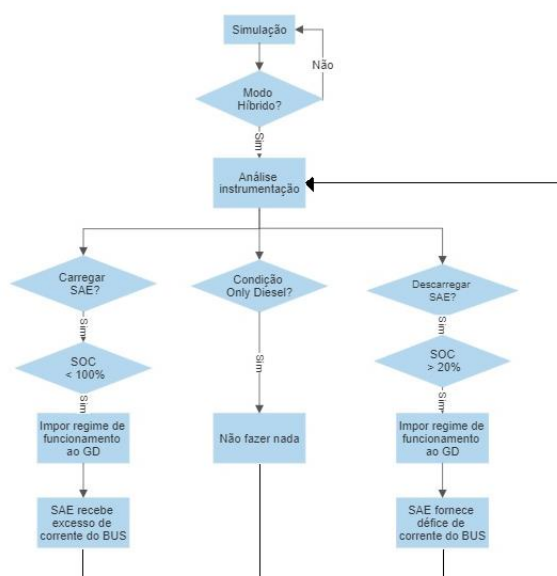


Figura 5.7 - Fluxograma geral do algoritmo de comando e controlo do SAE.

A metodologia escolhida para o controlo do SAE, baseia-se na análise da potência ativa no barramento principal (P\_BUS). Seguindo o fluxo do modelo, é analisado o P\_BUS e é verificado se estão reunidas as condições para:

- Carregar o SAE (*Charging\_condition*);
- Geradores diesel (GD) apenas (*Only\_diesel*);
- SAE fornecer energia (*Discharging\_condition*).

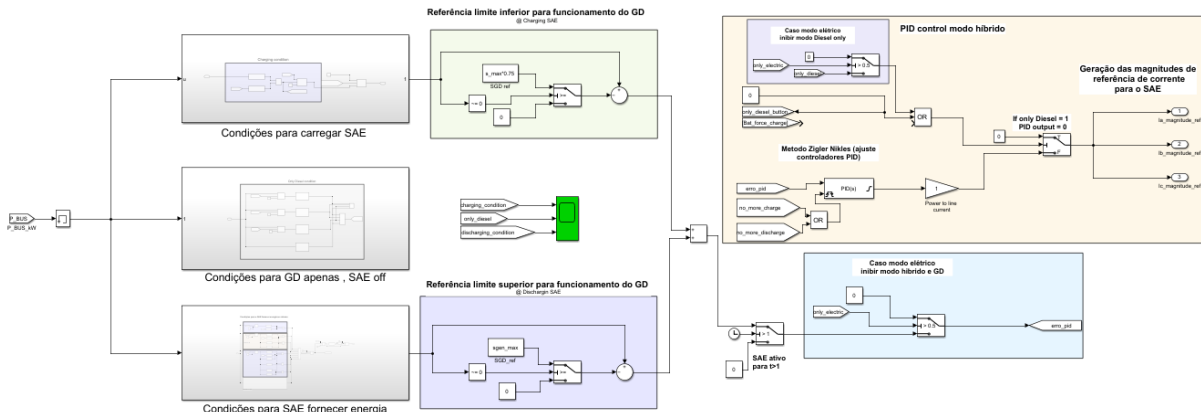


Figura 5.8 – Subsistema P Control

Inspecionando o interior do subsistema “Condições para o SAE fornecer energia” (figura 5.8), encontra-se a programação das condições para o SAE fornecer energia ao BUS, que materializa o conceito descrito na figura 3.5.

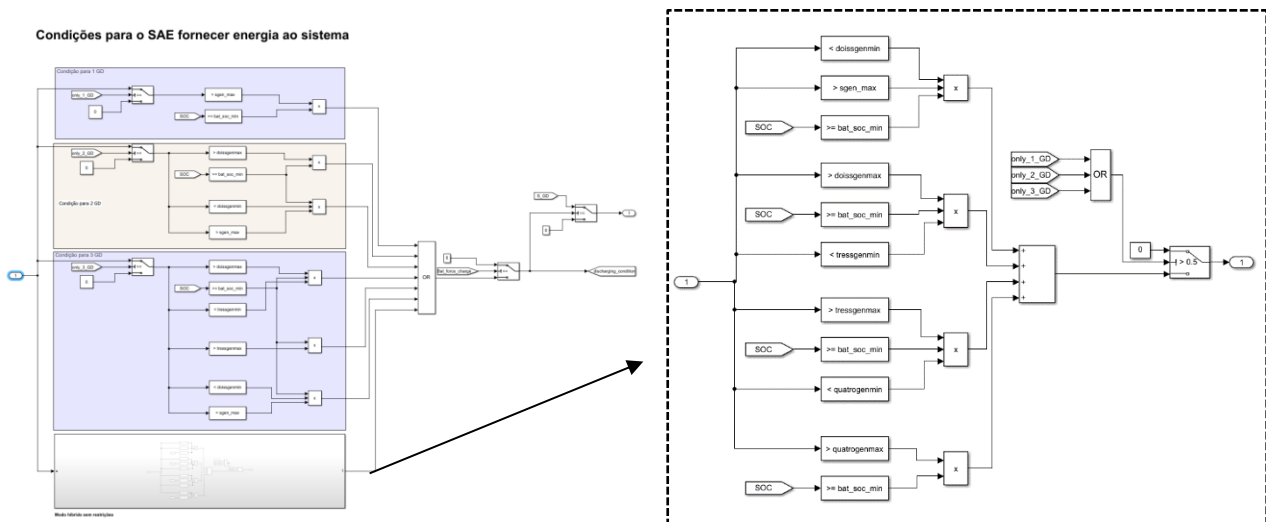


Figura 5.9- Condições para SAE fornecer energia e interior do subsistema sem restrições.

A programação no interior destes subsistemas, contempla diversas seguranças como, por exemplo, impossibilitar que o SAE entre em modo de descarga, se o SoC se encontrar abaixo do limite mínimo definido (neste caso 20% SoC), impossibilitar estarem duas condições ativas (modo *Only Electric* e *Only Diesel* por exemplo) em simultâneo, entre outras que oferecem robustez ao modelo.

## Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íões de lítio

No modo híbrido, consoante a condição ativa no momento, são dadas referências de potência aparente para os grupos eletrogéneos seguirem. Quando as referências estão ativas, é gerado um erro, em potência, que irá alimentar o controlador PID que, posteriormente, irá gerar um sinal de resposta em corrente. Este sinal de corrente será a amplitude da corrente que o SAE terá que fornecer à rede, para forçar os grupos eletrogéneos a seguir a referência, conforme esquemático simplificado da figura 5.10. Em suma, o erro gerado entre a potência aparente do grupo eletrogéneo e a sua referência (limite superior ou ponto de máxima eficiência), irá despoletar uma ação no SAE, para fornecer corrente no caso de défice de potência ativa ou receber corrente no caso de excesso de potência ativa.

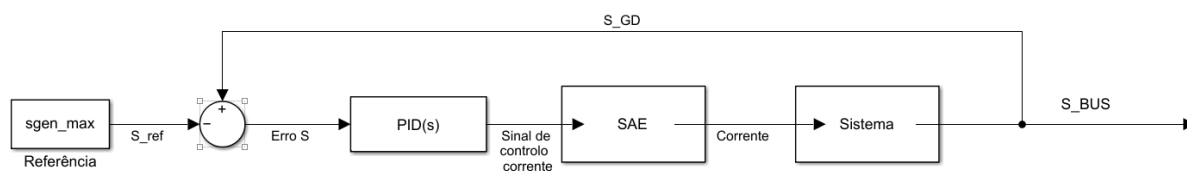


Figura 5.10- Diagrama do controlo proposto no modo híbrido.

O controlador PID foi parametrizado através do método Ziegler–Nichols [61], por forma a receber um erro em potência e despoletar uma ação em corrente. Os ganhos estão de acordo com a figura 5.10 e os limites da saída definidos conforme os limites de corrente de carga e descarga da bateria (descritos na figura 4.1).

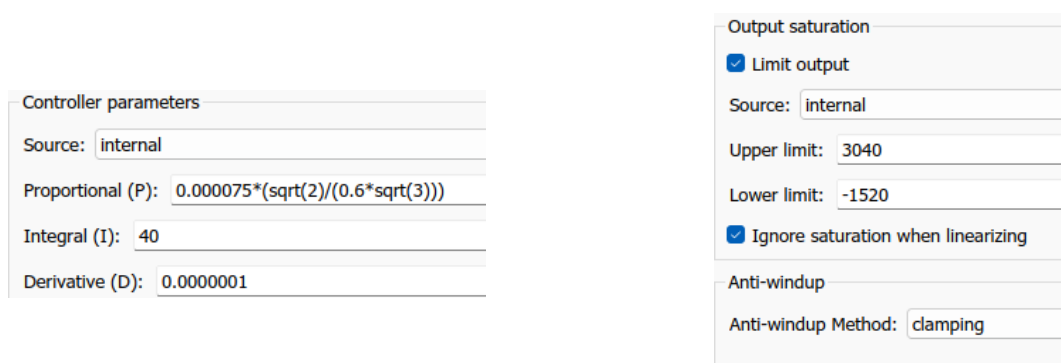


Figura 5.11 - Parâmetros do controlador PID.

### 5.2.4.2 – Grid Sync

Analisando o interior do subsistema *Grid Sync* da figura 5.6, verifica-se que aqui é gerada a referência em ângulo que a corrente terá de ter, para que seja possível realizar o sincronismo com a rede.

O sinal de referência é gerado em duas componentes, pois o SAE tem uma dupla função, compensar potência reativa e potência ativa. Uma vez que a simulação se encontra a funcionar em modo *Phasor*, os sinais serão gerados como fasores, em que são decompostos em valores de amplitude e ângulo.

A amplitude do fasor que irá compensar a potência reativa, foi elaborada retirando uma amostra da potência reativa da rede, a partir da qual é calculada a corrente de linha. O ângulo do fasor da corrente reativa é gerado retirando uma amostra da tensão da rede ( $V_a$ ) e subtraído  $90^\circ$  (conforme vetor azul da figura 5.12). Desta forma, o SAE irá compensar a toda a potência reativa presente na rede, fazendo com que do ponto de vista do grupo eletrogéneo o FP seja aproximadamente 1.

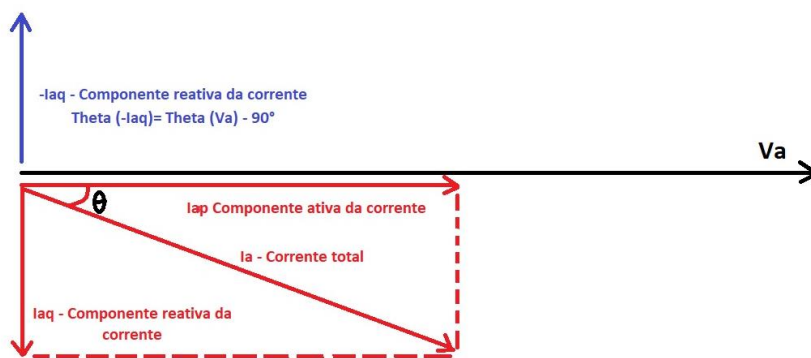


Figura 5.12 - Construção do ângulo da componente reativa da corrente que o SAE irá fornecer à rede para compensar o FP.

A amplitude do fasor da potência ativa foi, previamente, calculada no subsistema *P Control* enquanto o ângulo deste fasor, é igual ao ângulo da tensão da rede. De referir que o fasor da potência ativa apenas é fornecido ao conversor em momentos em que o SAE esteja a carregar ou descarregar (períodos em que os grupos eletrogéneos estejam a funcionar em regimes menos eficientes), em todos os restantes momentos apenas o fasor da potência reativa é fornecido ao conversor.

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de iões de lítio

Aproveitando o facto de o modelo funcionar em modo *Phasor*, a construção de ambos fasores foi realizada conforme manipulação descrita na figura 5.13.

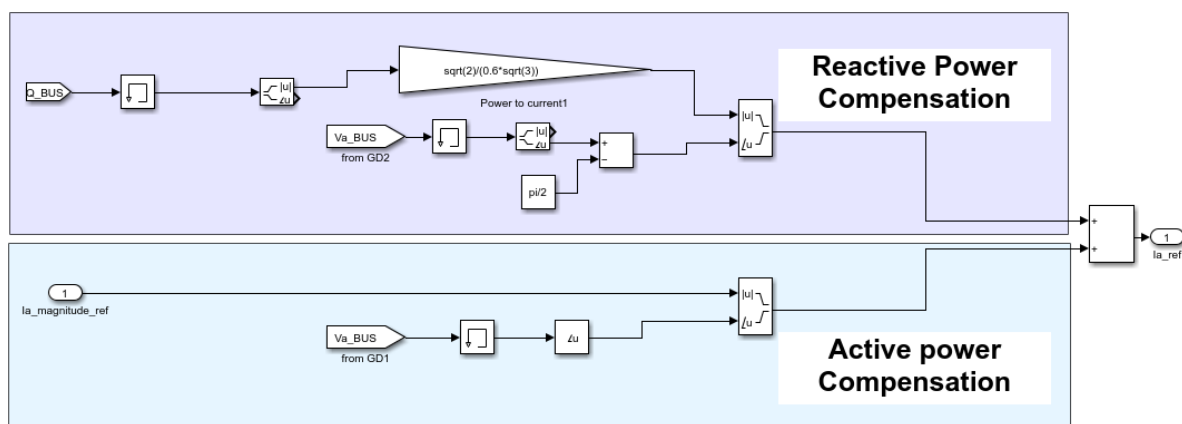


Figura 5.13 – Diagrama da construção dos sinais de referência para o SAE.

A razão para a utilização do bloco *Magnitude and angle to complex* deve-se ao facto da simulação funcionar em modo *Phasor*. Assim sendo, o sinal de controlo do bloco *Controlled Current Source* (figura 5.14) terá de ser, obrigatoriamente, um sinal em notação complexa.

### 5.2.4.3 – Subsistema SAE

No caso do sistema funcionar em modo híbrido, o SAE terá de ter o papel de fonte de corrente, mas caso funcione em modo puramente elétrico o SAE, obrigatoriamente, terá de ter o papel de fonte de tensão na rede. A figura 5.14 materializa este conceito de uma forma automática, consoante o input no painel de controlo do modelo.

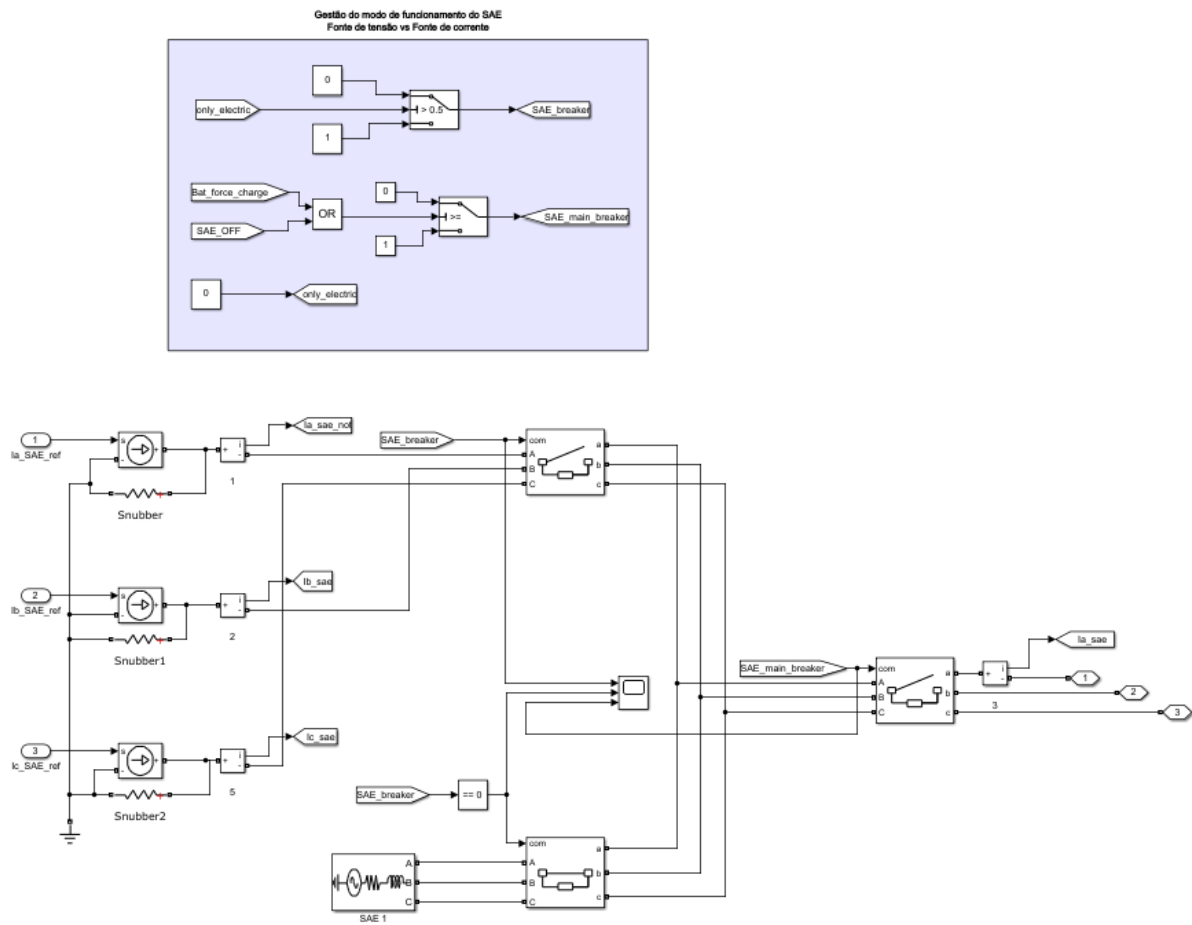


Figura 5.14- Interior do subsistema SAE.

### 5.2.4.4 – Battery Dynamics

Devido à simplificação efetuada na utilização de fontes de corrente e tensão ideais para simular o SAE, será necessário implementar uma forma de reproduzir a dinâmica de uma bateria em fase de carregamento e descarregamento, assim como estimar parâmetros do banco de baterias tais como o SoC, tensão e corrente.

Na impossibilidade de utilizar o bloco *Battery* devido a este não funcionar em modo *Phasor* foi necessário extrair o conteúdo deste mesmo bloco e adaptá-lo, conforme figura 5.15. Assim sendo, o interior do bloco *Battery* foi parametrizado conforme o algoritmo do mesmo para um banco de baterias com as especificações da figura 4.1.

Ao contrário da utilização convencional do bloco *Battery*, este não foi usado para fornecer ou armazenar energia, mas sim para estimar os parâmetros do SAE. Para isso, foi inserido uma

Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

fonte de corrente controlada entre o terminal positivo e negativo, em que o sinal de controlo deste é, precisamente, a corrente de saída do SAE.

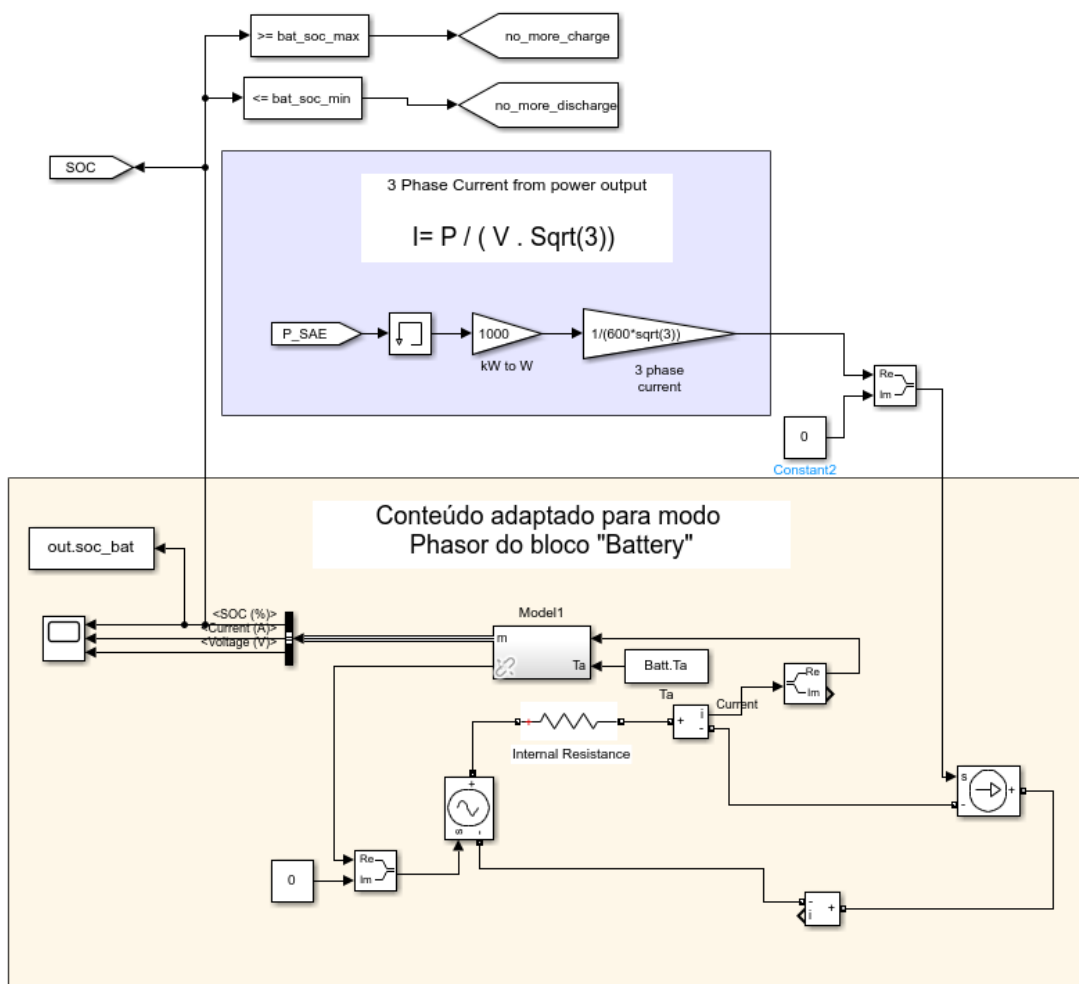


Figura 5.15 - Interior do subsistema *Battery Dynamics*.

### 5.2.5 – Motores elétricos propulsores

Dentro da área de “Carga do Navio”, da figura 5.1, nota-se que existem dois subsistemas que contribuem para o perfil de carga. O agente com o maior peso no perfil de carga é sem dúvida o MEP.

Uma vez que é conhecido o perfil de carga dos MEP em cada cenário, foi utilizado o bloco *Three-Phase Dynamic Load* para recriar a demanda de carga no navio (figura 5.16). O sinal de controlo deste bloco consiste nos valores de potência ativa e reativa. Este bloco necessita ainda

de uma resistência em paralelo para que funcione, daí a presença de uma carga resistiva com o valor de 10 kW.

A programação na área roxa, da figura 5.16, tem como objetivo selecionar os dados que se pretendem simular, consoante o perfil de carga escolhido no “Painel de Controlo” da figura 5.2, sem a necessidade de recorrer uma outra simulação. Os diversos perfis de carga ativa e reativa foram inseridos em *Lookup Tables*, que referenciam variáveis previamente colocadas no *Workspace* através de um ficheiro *Matlab* (de extensão .m).

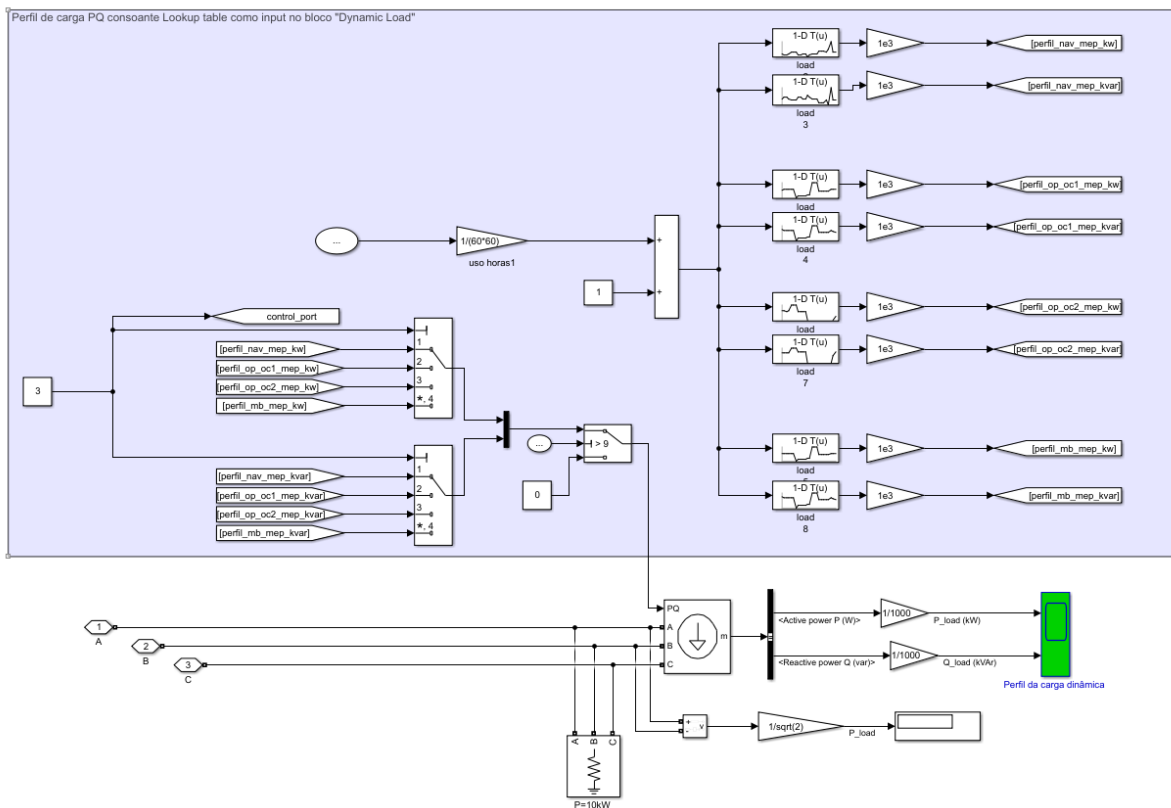


Figura 5.16 - Subsistema dos MEP.

### 5.2.6 – Carga Auxiliar do navio

O outro responsável pelo perfil de carga do navio é o QEA, no entanto, numa escala menor. Este subsistema, descrito na figura 5.17, contém os mesmos blocos que o subsistema “Motores Elétricos Propulsores”, no entanto, os sinais de entrada da carga dinâmica recriam o restante consumo do navio.

O QEA do navio, reproduz o restante do consumo do navio, que consiste em todos os equipamentos além dos motores propulsores, tais como bombas de incêndio e circulação de água, ares condicionados, guinchos, equipamento de hidrografia, radares, equipamentos de hotelaria, rede de lazer, entre outros.

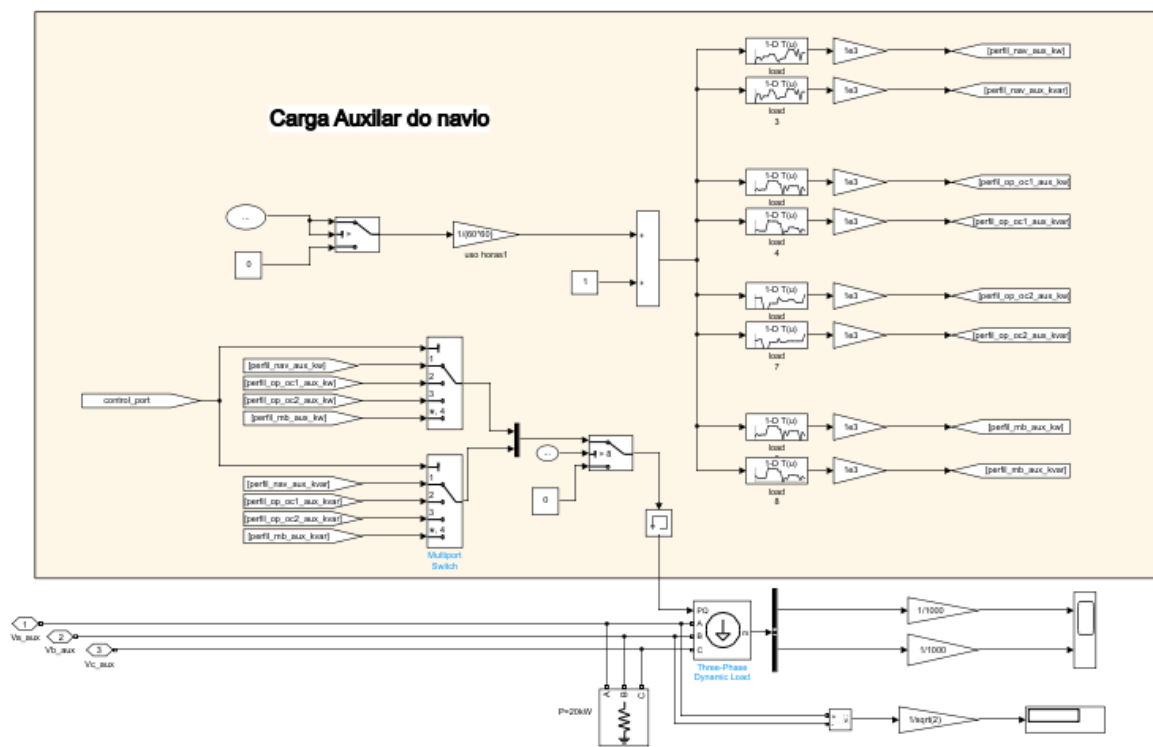


Figura 5.17 - Carga auxiliar do navio.

### 5.2.7 – Input data

Os dados que irão alimentar o modelo são os dados reais de consumo energético do navio, em períodos de 24h, trabalhados no subcapítulo 3.7. Estes dados foram categorizados consoante os seguintes perfis de utilização do navio:

- Navegação corrida;
- Operações oceanográficas 1;
- Operações oceanográficas 2;
- Manutenção de boias.

### 5.2.8 – *Phasor Model*

O *Phasor Model* é, maioritariamente, usado para estudar oscilações de potências de motores e geradores de grande dimensão. Como o objetivo deste trabalho é analisar os dados do modelo de uma forma macro, ou seja, neste caso não é relevante as micro oscilações que decorrem em frequências diferentes da tensão/corrente, o *software Matlab Simulink* “substitui” a resolução de todas as equações diferenciais, resultantes das interações entre os elementos resistivos, indutivos e capacitivos e passa a resolver um conjunto de equações algébricas, mais simples [62]. Apesar de ser um método mais simples apresenta limitações, pois apenas irá representar oscilações na frequência inserida na simulação, neste caso irá de encontro à frequência de 60 Hz (como a frequência da tensão a bordo).

Um outro aspeto a ter em conta é a necessidade do modelo simular períodos de 24 horas, o que torna os tipos de simulação mais convencionais como o modo “contínuo” e “discreto” demasiado detalhados, resultando em tempos de simulação impraticáveis. Assim sendo, optou-se por utilizar a tipologia de simulação *Phasor*, que computa todas as correntes e tensões do modelo como fasores, tornando a simulação mais “leve” e adequada ao detalhe necessário para realizar este estudo. Como referência, para computar um período de 24 horas, com a simulação em *Phasor Model* tende a demorar menos de 5 minutos.

Em suma, o facto de ser possível simular o navio em 3 configurações distintas e analisar 4 perfis de utilização num só modelo, que computa 24h de simulação em cerca de 5 minutos, facilitou a evolução da robustez do modelo que conferir qualidade e confiança nos resultados que serão analisados no próximo capítulo.

## Capítulo 6

### Resultados e discussão

#### 6.1 – Resultados

Neste capítulo, serão expostos os resultados das simulações, para períodos de 24h em diferentes perfis de consumo energético, utilizando os algoritmos *Only Diesel* e modo *Hybrid*.

Numa primeira fase, será analisado o balanço de potências ativas e reativas e a dinâmica do comissionamento de grupos em ambos os modos. Posteriormente serão verificados os dados de saída das simulações, entre os quais:

- Consumo total de combustível (diesel marítimo) em litros;
- Emissões totais de CO<sub>2</sub> em kg;
- *Specific Fuel Consumption* dos grupos eletrogéneos em g/kWh;
- Ponto de funcionamento dos grupos eletrogéneos, em % da capacidade total.

##### 6.1.1 – Perfil Navegação Corrida

Devido às suas características pouco oscilatórias e elevado volume de potência consumida, será expectável que este seja o perfil em que o modo híbrido trará menos benefícios. Como analogia, será como comparar a eficiência energética dum carro, com MCI e um híbrido *Plug in* numa autoestrada à velocidade cruzeiro.

Para este perfil verifica-se que, em ambos os modos, o SAE não fornece nem recebe potência ativa da rede, como demonstrado na figura 6.1. Isto porque a potência ativa na rede ao longo da simulação, no modo híbrido, encontra-se num nível em que é possível usar, exclusivamente, os grupos eletrogéneos dentro da janela de eficiência ótima. Ou seja, neste modo o SAE funciona com os propósitos de compensar a potência reativa e efetuar a reserva energética.



Figura 6.1 - À esquerda o balanço das potências ativas e reativas (PQ) em modo *Only Diesel* e à direita no modo *Hybrid*.

Analisando os gráficos da potência ativa, é perceptível que no modo híbrido os grupos eletrogêneos encontram-se a funcionar em regimes de eficiência ótima (no interior do intervalo delimitado a tracejado) ao contrário do modo *Only Diesel*, em que o funcionamento dos grupos é em regimes com menor carga e porventura menos eficientes.

Nos gráficos da potência reativa, no modo *Only Diesel*, como não existe compensação do fator de potência, os grupos eletrogêneos, têm de fornecer a potência reativa a esta carga, predominantemente, indutiva. No caso do modo *Hybrid*, verifica-se que o conversor bidirecional se encontra a realizar compensação da potência reativa de tal forma que os grupos eletrogêneos não “vejam” a componente reativa da potência e funcionem com um FP aproximadamente igual a 1, ou seja, a sua potência ativa é aproximadamente igual à sua potência aparente.

De notar ainda que, como no modo híbrido existe compensação do FP e a reserva energética está a cargo do SAE, apenas existem 2 grupos em comissionamento durante toda a simulação, ao contrário do que acontece no modo *Only Diesel*, em que existe a necessidade de comissionar os 4 grupos.

## Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íões de lítio

Comparando os dados da figura 6.2, constata-se que no final de 24 horas de navegação corrida, existe uma poupança estimada de 3113.4 l de combustível, e redução de 8983.6 kg de emissões de CO<sub>2</sub>. A utilização do modo *Hybrid* traduz-se numa redução de 31% de ambas variáveis.

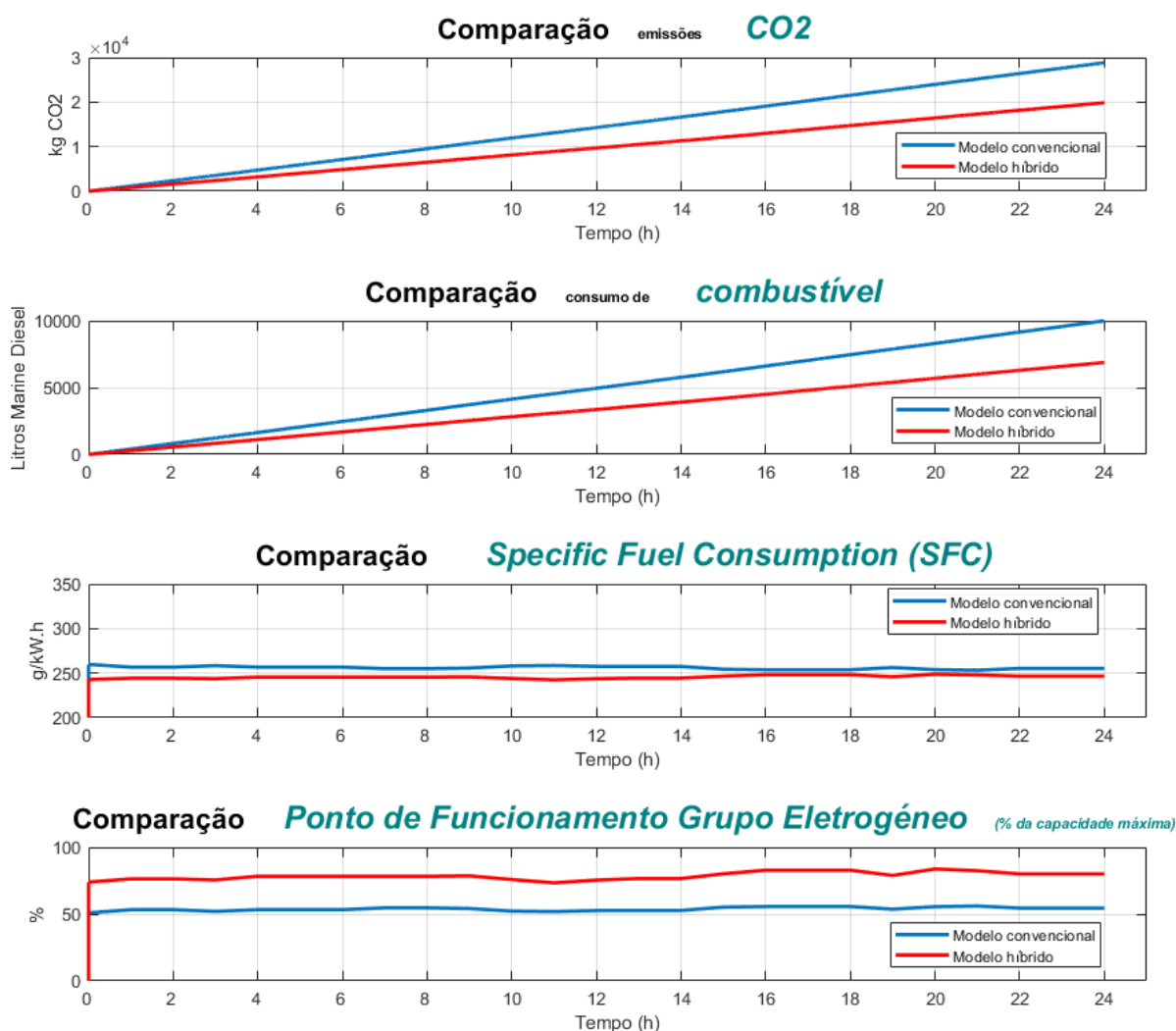


Figura 6.2 - Comparação dos dados de saída entre os modos de funcionamento.

### 6.1.2 – Perfil Operações Oceanográficas 1

Neste perfil de carga, que tem como principal característica um andamento mais oscilatório da potência da carga, será expectável uma maior rentabilização do SAE face ao caso anterior. Analisando o balanço de potências, da figura 6.3, constata-se que o SAE fornece potência ativa nos momentos em que não é possível manter os grupos dentro da janela de eficiência ótima.

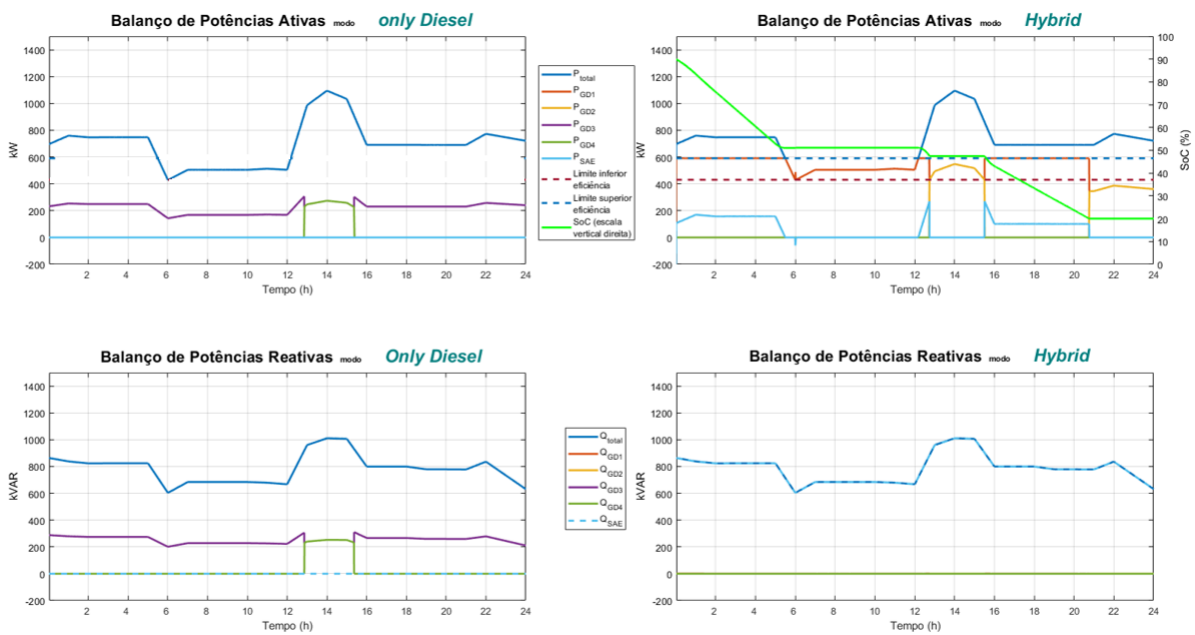


Figura 6.3 - Balanço de potências em modo *Only Diesel* e modo *Hybrid*.

Salientado que, à semelhança do perfil anterior, o modo *Hybrid* usa constantemente pelo menos um grupo a menos que o *Only Diesel*, existindo períodos como em  $t \in [0, 5]$  em que o modelo híbrido usa apenas um grupo em conjunto com o SAE, ao invés de 3 grupos como no modo *Only Diesel*.

De notar ainda que apesar dos potenciais ganhos em eficiência, o SoC do SAE após as 24 horas, encontra-se nos 20%, existindo um DoD de 70%, ou seja, este regime não seria sustentável por um período superior a um dia.

Comparando os dados da figura 6.4 constata-se que no final de 24 horas de operações oceanográficas com sondagens de profundidade, existe uma poupança de 3276.6 l de combustível, e redução de 10454.4 kg de emissões de  $CO_2$ . A utilização do modo *Hybrid* traduz-se numa redução de 43 % de ambas variáveis.

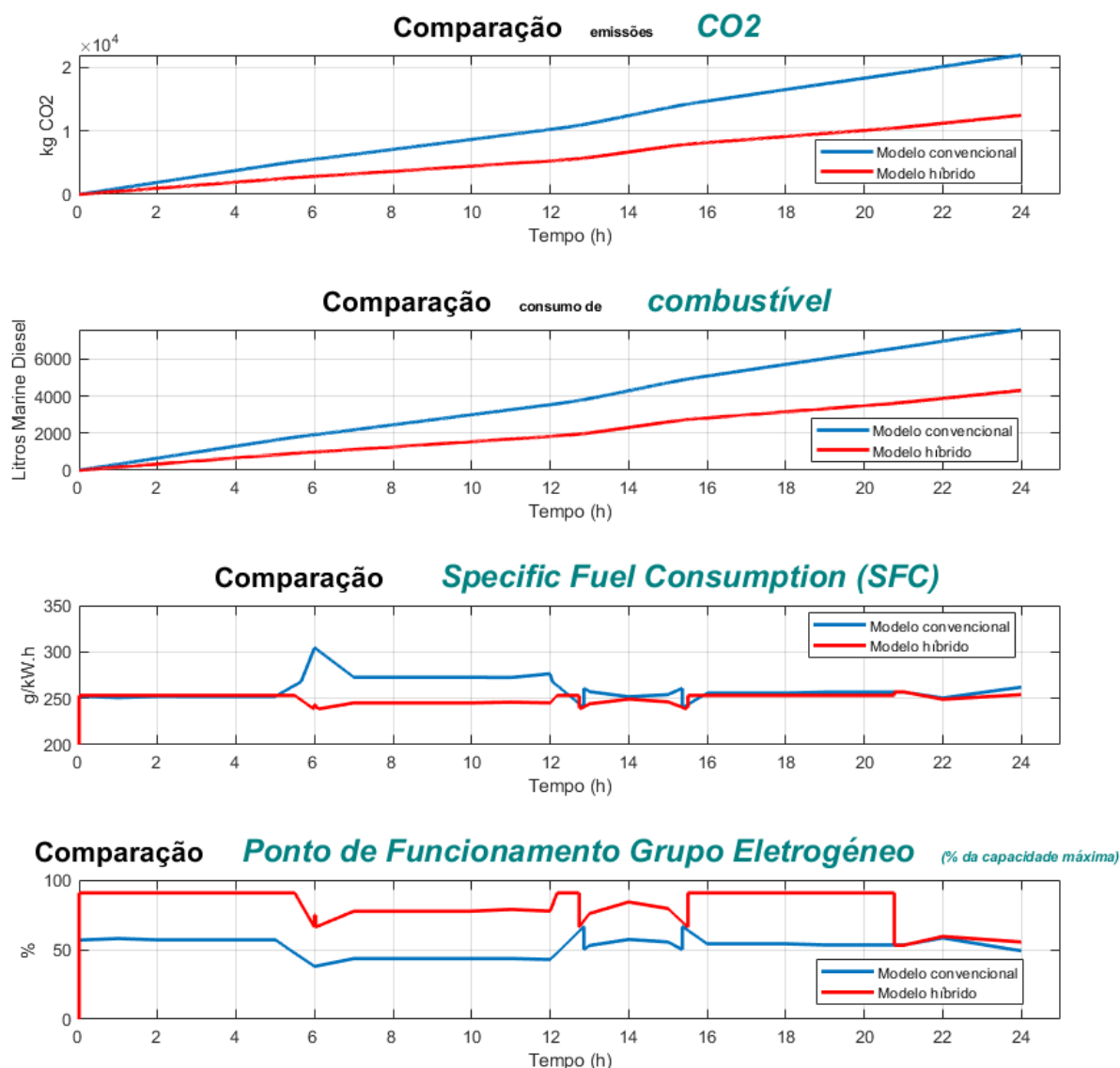


Figura 6.4 – Comparação dos dados de saída entre os dois modos de funcionamento.

### 6.1.3 – Perfil Operações Oceanográficas 2

Este perfil de carga será semelhante ao anterior na medida em que o perfil de carga é altamente oscilatório, mas, adicionalmente, terá um período em que o navio se encontra fundeado no período de  $t \in [11, 22]$ , como descrito na figura 6.5.

O SAE fornece potência ativa à rede nos períodos, em que não é possível fixar o ponto de funcionamento dos grupos dentro da janela de eficiência ótima. Adicionalmente, no período em que o navio se encontra fundeado, o ponto de funcionamento do grupo nº1, é fixado no seu

ponto de eficiência ótimo, deste modo o excesso de corrente na rede é utilizado para carregar o SAE.

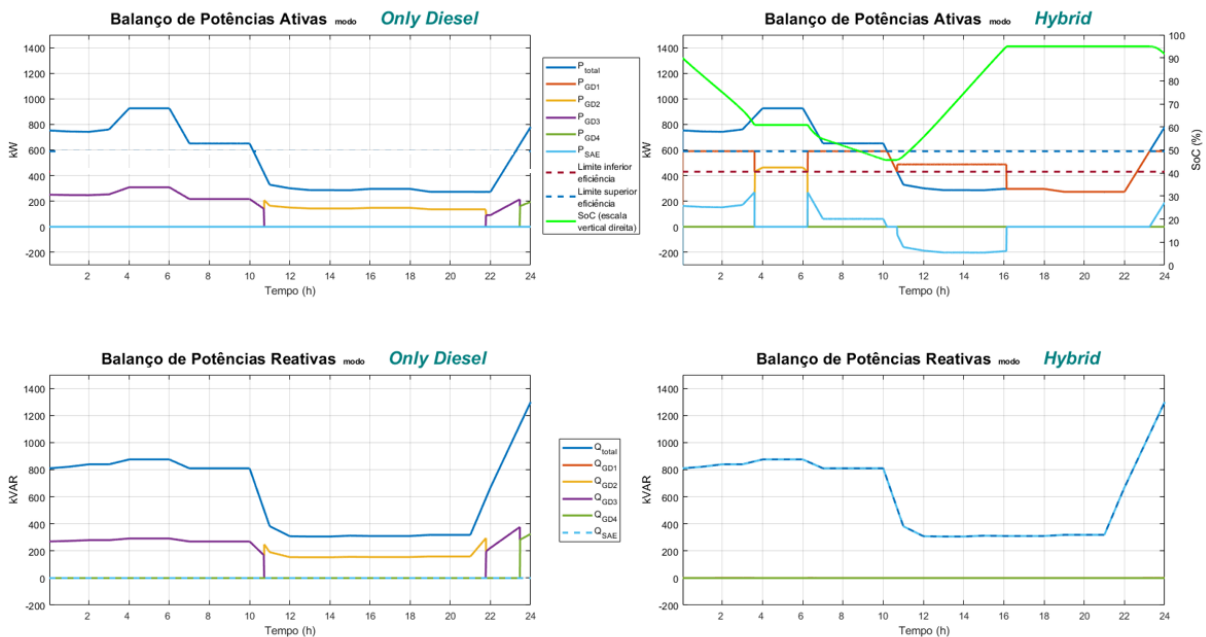


Figura 6.5 - Balço de potências em modo *Only Diesel* e modo *Hybrid*.

Importa destacar que, apesar do SoC ter descido de 90% até aos 45%, foi possível recuperar e até aumentar a energia armazenada no SAE comparativamente ao início da simulação, terminando com um SoC de 92%. Este cenário acarreta uma dupla vantagem, no sentido em que é possível poupar combustível e ainda possuir mais energia armazenada no SAE, que no início da simulação.

Comparando os dados da figura 6.6 constata-se que no final de 24 horas de operações com períodos fundeados, existe uma poupança de 2453.5 l de combustível, e redução de 7081.6 kg de emissões de  $CO_2$ . A utilização do modo *Hybrid* traduz-se numa redução de 41 % de ambas variáveis.

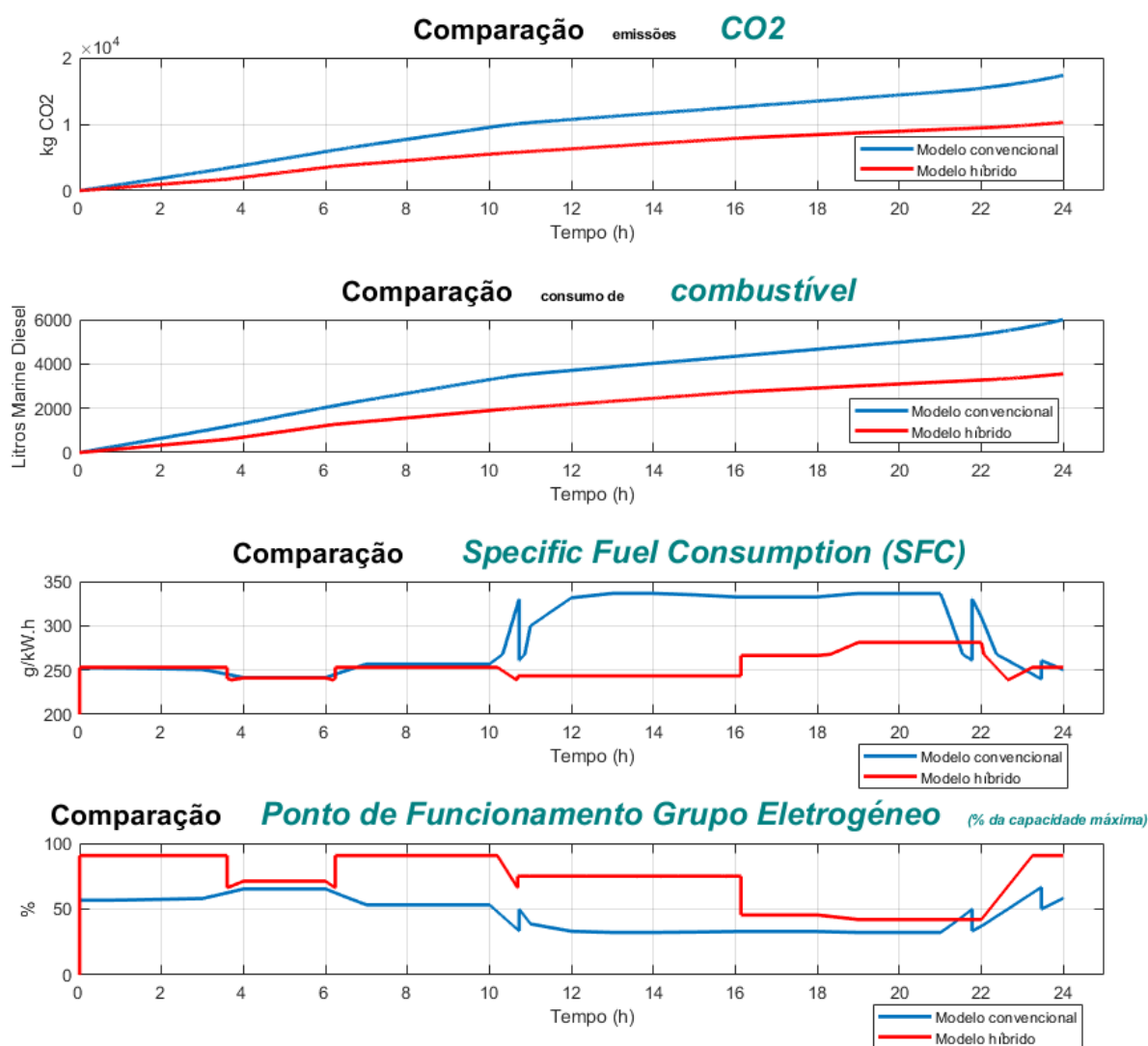


Figura 6.6 – Comparação dos dados de saída entre os dois modos de funcionamento.

### 6.1.4 – Perfil Manutenção Boias

Este perfil de carga é altamente oscilatório, o que representa um dia típico de trabalhos de manutenção de boias costeiras e/ou oceânicas, descrito na figura 6.7.

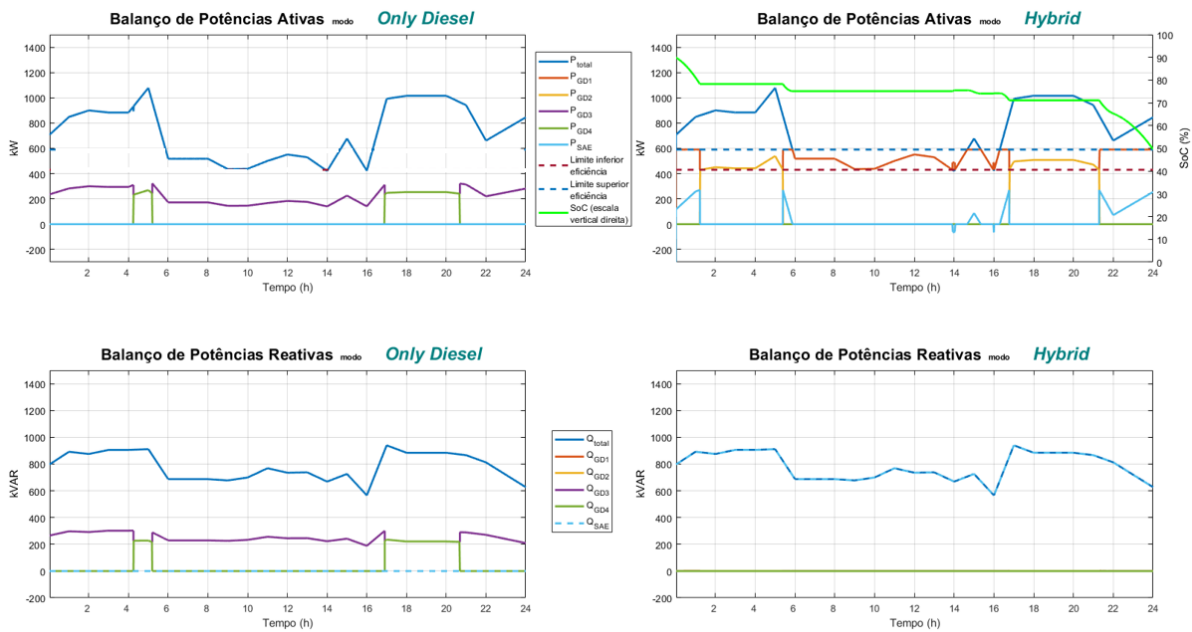


Figura 6.7 - Balanço de potências em modo *Only Diesel* e modo *Hybrid*.

À semelhança dos casos anteriores, a presença do SAE a realizar compensação do FP e reserva energética, permite que o modelo em modo *Hybrid* mantenha os grupos eletrogêneos dentro da janela de eficiência ótima. Adicionalmente, é notório que o SAE é especialmente ativo quando a potência ativa total na carga se encontra no intervalo compreendido entre os 650 e 900 kW. Pois, neste intervalo, o algoritmo compreende que consegue colocar apenas um grupo em comissionamento em conjunto com o SAE, desde que o SoC esteja acima do valor mínimo (20%).

Comparando os dados da figura 6.8 constata-se que no final de 24 horas de manutenção de boias, existe uma poupança de 3142.3 l de combustível, e redução de 9066.6 kg de emissões de  $CO_2$ . A utilização do modo *Hybrid* traduz-se numa redução de 41 % de ambas variáveis.

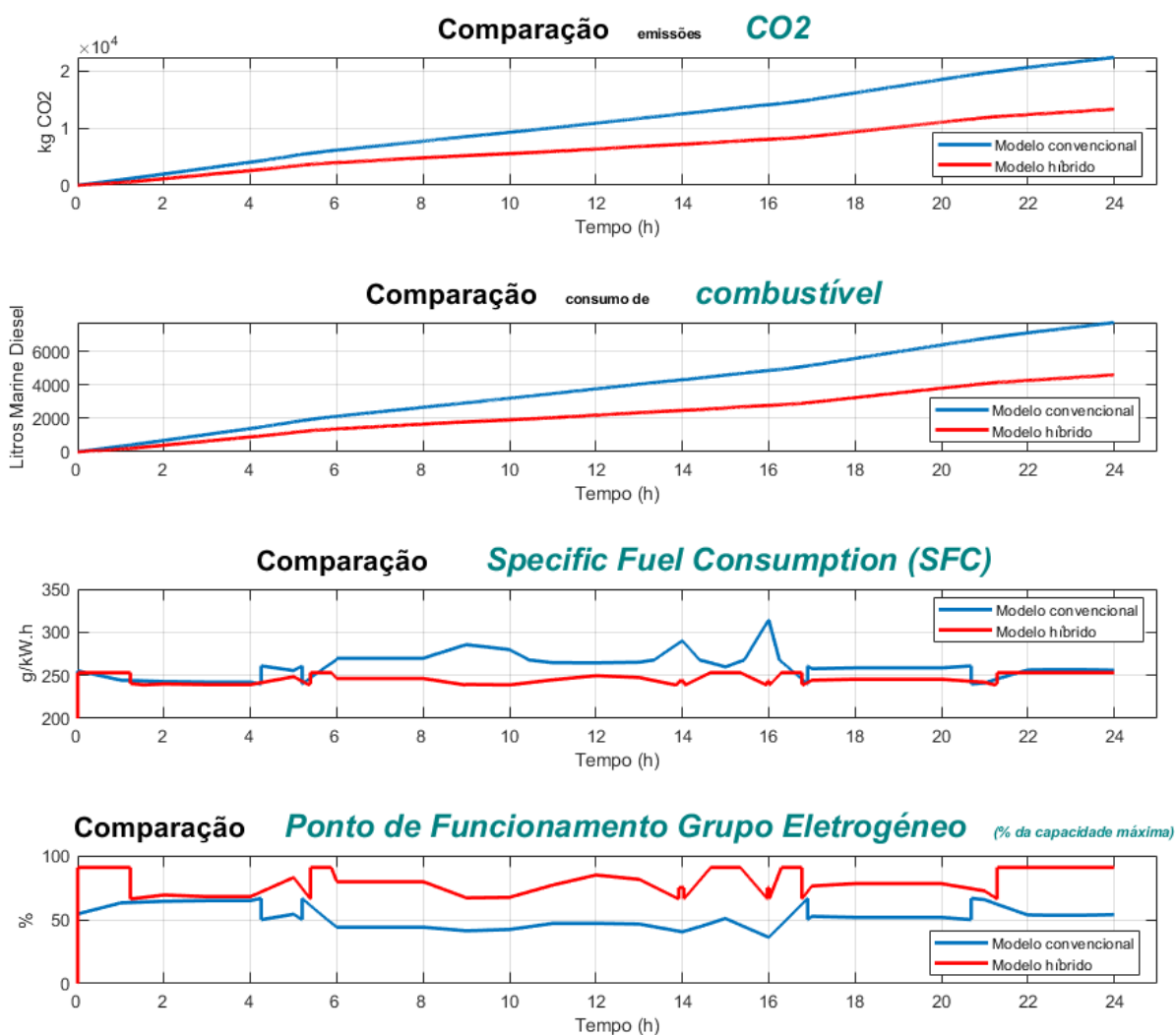


Figura 6.8 - Comparação dos dados de saída entre os dois modos de funcionamento.

## 6.2 – Discussão

Dos dados observados, é incontornável que o modelo híbrido proposto traz benefícios em relação à configuração atual do navio. O objetivo deste subcapítulo será pesar os benefícios mensuráveis e não mensuráveis contra o investimento necessário.

### 6.2.1 – Benefícios mensuráveis

Na tabela 6.1, encontra-se o resumo dos dados de saída das simulações expostas no subcapítulo 6.1.

Tabela 6.1 – Resumo dos resultados das simulações em modo *Only Diesel* e modo *Hybrid*.

<i>Perfil</i>	<b>Consumo Combustível (L)</b>	<b>Emissões CO<sub>2</sub> (kg)</b>	<b>Consumo Combustível (L)</b>	<b>Emissões CO<sub>2</sub> (kg)</b>	<b>Poupança Consumos combustível (L (%))</b>	<b>Poupança emissões CO<sub>2</sub> (kg (%))</b>
	Modo <i>Only Diesel</i>			Modo <i>Hybrid</i>		
Navegação Corrida	9 993.8	28 836.2	6 880.4	19 852.6	3 113.4 (31.15%)	8 983.6 (31.15%)
Op. Oceanográficas 1	7 587.0	22 891.6	4 310.4	12 437.2	3 276.6 (43.19%)	10 454.4 (43.19%)
Op. Oceanográficas 2	6 012.3	17 347.9	3 558.0	10 266.3	2 453.5 (40.81%)	7 081.6 (40.81%)
Op. Manutenção Boias	7 756.1	22 379.3	4 613.8	13 312.7	3 142.3 (40.52%)	9 066.6 (40.52%)

Dos dados analisados, pode-se constatar que a implementação do sistema híbrido, em conjunto com a implementação de um novo algoritmo de gestão de grupos em comissionamento, trará um aumento da eficiência energética na ordem dos 31.2 a 43.2%.

Em parte, o aumento da eficiência energética, deve-se à contribuição energética do SAE, no entanto, a maior contribuição deve-se, objetivamente, à compensação do FP e ao novo algoritmo de gestão do comissionamento de grupos eletrogéneos. Esta nova gestão de grupos, altera o ponto de funcionamento dos grupos diminuindo o SFC.

De realçar que os cenários em que o navio é menos eficiente<sup>11</sup>, nomeadamente o cenário de posição dinâmica e manobras de atracação, não foram avaliados como os restantes cenários devido à indisponibilidade dos dados. Portanto, é possível que nesses cenários fosse observável um aumento da eficiência energética ainda mais significativo que os cenários avaliados neste trabalho.

<sup>11</sup> Cenários em que o número de grupos em comissionamento é fixado em 3 ou 4 (consoante o estado do mar) independentemente da carga a ser consumida.

Por último, importa salientar que os planos de navegação dos navios são previsíveis e conhecidos antes de iniciar a viagem. Isto para dizer que, é complicado obter uma solução ótima para todos os cenários sem conhecimento prévio da tipologia do empenhamento do navio. Um dos desenvolvimentos futuros para este trabalho seria, o algoritmo ter a capacidade de se adaptar quando o planeamento de navegação fosse inserido no sistema. Por este motivo, seria mais vantajoso criar vários algoritmos específicos para cada perfil de utilização de modo a maximizar a eficiência energética em cada perfil, ao invés, de ter um único algoritmo para todas as situações. Assim, após a inserção do plano de navegação, o algoritmo (utilizando redes neuronais por exemplo) analisa o planeamento inserido e adaptar-se-ia ao cenário de forma automática, sendo mais eficiente que a versão testada neste trabalho.

## **6.2.2 – Benefícios não mensuráveis**

Para além dos óbvios benefícios financeiros e redução das emissões de  $CO_2$ , existe uma panóplia de outros fatores não quantificáveis neste trabalho que podem adicionar valor ao adoptar esta solução híbrida.

### **6.2.2.1 – Horas de funcionamento**

Conforme constatado no subcapítulo 6.1, verificou-se constantemente que, no modo híbrido existem menos grupos comissionados em simultâneo em relação ao modo convencional. Particularmente, verificou-se que existe menos um grupo comissionado em grande parte das simulações e em algumas instâncias menos dois grupos. Inevitavelmente, ao utilizar menos grupos para satisfazer a mesma carga, as horas de funcionamento por grupo vão ser menores ao fim de determinado período. Este fator influencia as manutenções condicionais, (exemplo: revisão geral das 25 000 horas), fazendo com que as mesmas sejam atrasadas, consideravelmente, levando a que o navio se encontre operacional mais tempo durante a sua vida útil.

### **6.2.2.2 – Degradação mecânica dos motores devido a exposição constante a cargas leves**

Utilizando os dados do fabricante [63], os grupos eletrogêneos de funcionamento contínuo são projetados, para funcionar em regimes compreendidos entre 70% e 100% da capacidade máxima. O funcionamento pontual com cargas baixas (30% ou menos) não traz qualquer degradação, enquanto que o funcionamento prolongado nestes regimes, por levar à presença de “baba de motor”. A “baba de motor” é definida por Brian Jabeck, como um“(…)líquido preto e oleoso no coletor de escape, devido às temperaturas mais baixas no cilindro, permitindo que o combustível não queimado e os depósitos de óleo vazem pelas juntas de escape. A sua presença não é um problema por si só, mas pode ser indicador de aglomeração de depósitos no interior dos anéis dos pistões, depósitos no interior dos cilindros e, em casos extremos, polimento da camisa do cilindro. Estas situações podem levar a perdas de energia, desgaste acelerado, baixo desempenho e, ultimamente, aumento dos custos de manutenção devido a falhas não planeadas”.

Para colmatar esta situação, a solução híbrida proposta força os grupos a funcionar em regimes compreendidos entre 67% e os 90% da capacidade máxima, ao contrário da gestão atual dos grupos que prevê uma utilização contínua em regimes mais baixos (33% e 67%).

### **6.2.2.3 – Redução do perfil acústico**

Sabe-se que o ruído acústico causado pelos navios tem impacto negativo nos organismos marinhos [64], podendo levar a casos de migração forçada de certas espécies [65]. Com menos grupos eletrogêneos em comissionamento simultâneo, existirão menos vibrações na estrutura do navio reduzindo o perfil acústico deste, melhorando, assim, as condições ambientais para as espécies marinhas.

### **6.2.2.4 – Percurso de porto em modo elétrico**

Uma das vantagens que o SAE, projetado neste trabalho, detém, é a capacidade de realizar os percursos dos portos mais frequentados, em modo completamente elétrico. Assim, é possível evitar, completamente, as emissões de GEE e reduzir consideravelmente o perfil acústico na entrada e saída de portos onde o impacto é mais direto na sociedade.

### 6.2.3 – Investimento e retorno financeiro

Com os dados do subcapítulo 6.1, é possível realizar uma breve análise sobre o impacto financeiro que teria a aquisição do SAE dimensionado neste trabalho. Retirando o preço médio por kWh das baterias de íões de lítio registadas em 2021 [66] que é de €132/kWh, e multiplicando esse valor pela capacidade do SAE, obtemos que o investimento terá de ser, no mínimo, de 264 000 €. Adicionando uma solução modular contentorizada, BMS, conversor bidirecional, sistema de controlo e segurança, transporte e instalação, o valor total poderá duplicar e ficar nos 500 000 €.

Para a análise financeira foram feitas as seguintes considerações:

- Tempo restante de vida útil do navio – 15 anos;
- Dias navegação por ano: 150 dias;
- Tipo de navegação: 40% navegação corrida, 20% operações oceanográficas 1, 20% operações oceanográficas e 20% manutenção boias;
- Preço combustível marítimo (assumindo subida do preço em 5% por ano): 0.90 €/l no primeiro ano.

Os resultados da extrapolação dos dados das simulações, apresentados no subcapítulo 6.1 com as considerações anteriores, encontram-se descritos na tabela 6.2.

Analisando a tabela 6.2, torna-se interessante visualizar o impacto que uma melhoria média de 37.4% da eficiência energética, surte num navio. De realçar que em pouco mais que 1 ano, o investimento de 500 000 € estará saldado e que a partir daí será lucro para o investidor.

De notar que, a estimativa da tabela acima é bastante conservadora em termos de vida útil do navio, pois, tipicamente, o tempo de vida útil tende a rondar os 30 anos ou mais. Importa salientar que, segundo alguns dos fabricantes, os bancos de baterias desta dimensão [67], [68], [69] asseguram entre 3000 e 5000 ciclos (dependendo do DoD utilizado). Por este motivo será expectável que um grupo de baterias desta tipologia sustente entre 20 e 33 anos (assumindo um ciclo por dia de navegação).

Tabela 6.2 - Extrapolação dos resultados da melhoria de eficiência energética a 15 anos.

Ano	Preço combustível marítimo (€)	Consumo combustível anual modo convencional (l)	Consumo combustível anual modo híbrido(l)	Redução de consumo anual combustível (l)	Redução de custos anual (€)	Soma das reduções anuais de custos (€)
1	0,90	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	407 678.40	407 678.40
2	0,95	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	428 062.32	835 740.72
3	0,99	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	449 465.44	1 285 206.16
4	1,04	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	471 938.71	1 757 144.86
5	1,09	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	495 535.64	2 252 680.51
6	1,15	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	520 312.43	2 772 992.93
7	1,21	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	546 328.05	3 319 320.98
8	1,27	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	573 644.45	3 892 965.43
9	1,33	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	602 326.67	4 495292.10
10	1,40	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	632 443.00	5 127 735.10
11	1,47	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	664 065.16	5 791 800.26
12	1,54	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	697 268.41	6 489 068.67
13	1,62	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	732 131.83	7 22 1200.51
14	1,70	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	768 738.43	7 989 938.93
15	1,78	1 240 290.00	787 290.00	452 976.00	807 175.35	8 797 114.28
<i>Total</i>	-	18 604 350.00	11 809 350.00	6 795 000.00	8 797 114.28	8 797 114.28
<i>Total (Milhões €)</i>	-	18.60	11.81	6.80	8.80	8.80

### 6.2.4 – Resultados vs metas de emissões de dióxido de carbono para 2030

Revisitando as metas da Organização Internacional Marítima (IMO) para 2030, que preveem uma redução em 40% das emissões de GEE no setor marítimo, fica claro que com as medidas propostas neste trabalho as reduções estimadas ficam muito próximas de cumprir com as metas setor.

## Descarbonização e otimização energética de um navio hidrográfico através de armazenamento de energia com baterias de íons de lítio

---

De notar que, ainda existe margem para melhorar a eficiência energética que não foram abordadas neste trabalho. Estratégias estas que poderiam passar por:

- Alteração do dimensionamento de cada grupo electroprodutor, por forma a que seja possível otimizar, ainda mais, o algoritmo de comissionamento de grupos;
- Utilização de combustíveis alternativos tais como o gás natural liquefeito [70] que vai de encontro ao limite imposto para emissões de enxofre e potencialmente pode levar a uma redução adicional de 20% das emissões de dióxido de carbono;
- Alteração do conjunto de motores elétricos propulsores e hélice, para versões mais eficientes.

Qualquer uma das estratégias acima não traria uma relação custo/benefício equiparável à proposta neste trabalho, no entanto, indiscutivelmente seriam positivas para o ambiente.



## Capítulo 7

### Conclusões

#### 7.1 – Conclusões Gerais

Os objetivos propostos nesta dissertação foram concretizados, fazendo uso de uma simulação numérica da instalação elétrica e propulsora do navio em estudo.

A simulação numérica permite selecionar um de três modos de funcionamento através de um painel de controlo interativo. O modo *Only Diesel*, representa a configuração convencional do navio, assim como a gestão atual de comissionamento dos grupos eletrogéneos. O modo *Hybrid* permite, na mesma simulação, recriar a configuração híbrida, com um SAE de baterias de íons de lítio, assim como compensar o fator de potência da rede e implementar o novo algoritmo de gestão de grupos eletrogéneos proposto nesta dissertação. O modo *Only Electric*, permite o funcionamento da instalação em modo estritamente elétrico, possibilitando extrair dados de autonomia do navio neste modo.

A simulação numérica foi elaborada, por forma a replicar os parâmetros dos grupos electroprodutores reais do navio, com o objetivo de extrair os dados de consumo energético, da forma mais coerente possível. Na versão híbrida, o banco de baterias de íons de lítio foi dimensionado, por forma a cumprir requisitos específicos do navio e deste modo possibilitar a maximização da eficiência dos grupos electroprodutores.

Os diferentes perfis de carga utilizados na simulação numérica, foram retirados de registos reais de navegação e parâmetros elétricos efetuados a bordo durante os anos de 2020 e 2021 em diversas missões.

Nesta dissertação foi possível demonstrar que através de um investimento relativamente baixo (aproximadamente 1% do custo de aquisição de um navio desta tipologia) e um trabalho tecnológico exequível, é possível impactar positivamente na eficiência energética do navio (em aproximadamente 37%), trazendo vantagens ambientais, assim como financeiras para o investidor sem comprometer o cumprimento da missão do navio.

## 7.2 – Desenvolvimentos futuros

Este trabalho representa apenas um dos passos para a concretização das metas consentidas no Acordo de Paris, com o objetivo final de descarbonizar por completo o setor marítimo. Neste sentido, existem tópicos úteis que podem ser desenvolvidos tendo como base esta investigação, nomeadamente:

- Otimização da eficiência energética, com base num algoritmo adaptativo consoante o planeamento de navegação inserido;
- Utilização de grupos electroprodutores de diferentes dimensões, por forma a possibilitar a maximização da eficiência energética;
- Estudo do potencial da implementação de grupos electroprodutores com velocidade variável, em momentos em que a carga é mais baixa;
- Utilização de combustíveis alternativos tais como o hidrogénio e o gás de petróleo liquefeito;
- Exploração do potencial na utilização de *Flow Batteries* a bordo dos navios, fazendo uso dos grandes tanques de combustível como reservatórios de eletrólitos.

## Referências bibliográficas

- [1] United in Science, “Greenhouse Gas Concentrations in the Atmosphere,” 2021.
- [2] BP, *Statistical Review 2021 | 70th edition*, 2021.
- [3] E. Commission, *Delivering the European Green Deal*, 2021.
- [4] Commission, European, “Stepping up Europe’s 2030 climate ambition,” 17 Setembro 2020.
- [5] Organization, International Maritime, “Adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reduction HGC emissions in the shipping sector,” 2018.
- [6] Portuguesa, Marinha, “NRP Almirante Gago Coutinho,” [Online]. Available: [https://www.marinha.pt/pt/os\\_meios/hidrograficos/Paginas/nrp-almirante-gago-coutinho.aspx](https://www.marinha.pt/pt/os_meios/hidrograficos/Paginas/nrp-almirante-gago-coutinho.aspx).
- [7] R. L. Galloway, *The steam engine and its inventors*, Londres: Macmillan and Co., 1881.
- [8] W. Grenning, *History of the Otto - Langen engine*, N. Ridge Rd Lockport NY: Gas Engine Magazine, 1997.
- [9] D. Wuebbles, D. Fahey, K. Hibbard, B. DeAngelo, S. Doherty, K. Hayhoe, R. Horton e J. Kossin, “Climate Science Special Report: A Sustained Assessment Activity of the U.S. Global,” U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 2017.
- [10] United Nations, “Report of the Conference of the Parties on its twenty-first,” 2016.
- [11] S. Simone, W. Peter e S. Thankappan, *Socio-technical inertia: Understanding the barriers to electric vehicles*, 2013.
- [12] EG&G Technical Services, Inc., *Fuel Cell Handbook*, Morgantown, West Virginia 26507-0880, 2004.
- [13] J. Babicz, *Encyclopedia of ship technology*, WÄRTSILÄ CORPORATION, 2008.

- [14] C. A. Vásquez, “Evaluation of Medium Speed Diesel generator sets and energy storage technologies as alternatives for reducing fuel consumption and exhaust emissions in electric propulsion systems for PSVs,” p. 50, Janeiro 2016.
- [15] S. Caiying, S. Peng e T. Gao, “A Comprehensive Overview of Hybrid Electric Vehicles,” *A Comprehensive Overview of Hybrid Electric Vehicles*, pp. 2-3, Setembro 2011.
- [16] F. Chan, *The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles*, pp. 260-261, February 2002.
- [17] M. Salman, *Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles*, pp. 461-463, Junho 2002.
- [18] M. Salman, “IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003,” *Energy management strategies for hybrid electric vehicles*, pp. 241 - 248, 2003.
- [19] C. Goering, *Engine hooel for mapping BSFC contour*, pp. 514-515, 1988.
- [20] M. Rahnejat, *Optimisation of the vehicle transmission and the gear-shifting strategy for the minimum fuel consumption and the minimum nitrogen oxide emissions*, pp. 3-7, Abril 2016.
- [21] Evannex, “Electric car arquitetura and diagrams,” [Online]. Available: <https://evannex.com/pages/types-of-electric-car-motors-ev105>. [Acedido em 25 Dezembro 2021].
- [22] S. Fuad, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah e E. Hossain, “A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development,” *A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development*, pp. 1-82, Maio 2017.
- [23] Infineon Technologies, “Electric Ships\_ the Future of Shipping,” Junho 2021. [Online]. Available: <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/electrified-ships/>. [Acedido em 14 Dezembro 2021].
- [24] C. Randall, “Electrive,” Março 2021. [Online]. Available: <https://www.electrive.com/2021/03/02/worlds-largest-electric-ferry-yet-goes-into-service-in-norway/>. [Acedido em 14 Dezembro 2021].

- [25] N. Frithiof, “Five lessons to learn on hydrogen as ship fuel,” julho 2021. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Five-lessons-to-learn-on-hydrogen-as-ship-fuel.html>.
- [26] A. Appleby e F. Foulkes, *Fuel Cell Handbook*, New York, USA: Van Nostrand, 1989.
- [27] T. Taner, “An overview of PEM fuel cell technology,” em *Introductory Chapter*, 2018.
- [28] M. Tellez Cruz, J. Escorihuela, O. Soloroza e V. Compañ, “Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): advances and challenges,” 10 setembro 2021.
- [29] NASA, “Space Applications of Hydrogen and Fuel Cells,” 27 Maio 2021. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/content/space-applications-of-hydrogen-and-fuel-cells>. [Acedido em 17 Dezembro 2021].
- [30] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy,, “Hydrogen Storage - Basics,” Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage-basics-0>. [Acedido em Dezembro 2021].
- [31] E. Boateng e A. Chen, “Materials Today Advances,” *Recent advances in nanomaterial-based solid-state hydrogen storage*, Julho 2019.
- [32] D. L. Reddy e T. B., *Handbook of batteries* 3rd ed, McGraw-Hill, 2001.
- [33] D. Deng, “Li-ion batteries: basics, progress, and challenges,” *Energy Science & Engineering*, 12 agosto 2015.
- [34] M. S. Z. Trancij e J. E., “Re-examining rates of lithium-ion battery,” *Royal Society of Chemistry*, nº Energy & Environmental Science, pp. 2-9, 2021.
- [35] V. Henze, “Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh,” BloombergNEF, 16 dezembro 2020. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>. [Acedido em 30 dezembro 2021].

- [36] G. Berckmans, M. Messagie, J. Smekens, N. Omar, L. Vanhaverbeke e J. V. Mierlo, “Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030,” *Energies*, pp. 3-4, 2017.
- [37] Tesla , “Tesla Powerwall datasheet,” 11 junho 2019. [Online]. Available: [https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall%20AC\\_Datasheet\\_en\\_northamerica.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall%20AC_Datasheet_en_northamerica.pdf). [Acedido em 30 dezembro 2021].
- [38] J. S. Martín, I. Zamora, J. S. Martín, V. Aperribay e P. Eguía, “Energy storage technologies for electric applications,” em *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 2011.
- [39] D. Herman, *Comparision of Storage Technologies for Distributed Resource Applications*, California, USA: EPRI, 2003.
- [40] X. Luo e M. Dooner, *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, pp. 9-10, outubro 2014.
- [41] DiLiCo engineering, “Redox flow battery, Functionality, types and research,” [Online]. Available: <https://www.dilico.de/en/redoxflow.php>. [Acedido em 7 janeiro 2022].
- [42] A. Colthorpe, “Energy Storage News,” 24 dezembro 2021. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/south-koreas-h2-inc-plans-20mwh-flow-battery-at-california-gas-peaker-plant-site/>. [Acedido em 07 janeiro 2022].
- [43] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. Regtien e P. H. Notten, *Battery Management Systems - Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*, Philips Research Laboratories, Eindhoven, The Netherlands: Springer, 2008.
- [44] H. A. Gabbar, A. M. Othman e M. R. Abdussami, “Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards,” pp. 1-21, 11 abril 2021.
- [45] Kemet Engineering Center, “Application Note | BMS and KEMET METCOM Inductors,” 5 novembro 2021. [Online]. Available: <https://ec.kemet.com/blog/application-note-battery-mgmt-system-and-kemet-metcom-inductors/>. [Acedido em 24 janeiro 2022].

- [46] Z. B. Omariba, L. Zhang e D. Sun, “IEEE Access,” *Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles*, pp. 129340 - 129342, 12 setembro 2019.
- [47] A. Raj, “Circuit Digest,” 23 fevereiro 2019. [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/article/cell-balancing-techniques-and-how-to-use-them>. [Acedido em 24 janeiro 2022].
- [48] M. Hossain, M. Faisal, S. Ansari, M. Hannan, T. Karim, A. Ayo, A. Hussain, M. S. Miah e M. H. Saa, *Review of Electric Vehicle Converter Configurations, Control Schemes and Optimizations: Challenges and Suggestions*, pp. 2-30, 17 fevereiro 2021.
- [49] M. Y. Krein e P. T., “Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicle,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 5 Maio 2012.
- [50] Roger Rosborough - Caterpillar , “Comparing Volumetric Fuel Consumptions,” 2019.
- [51] V. Monteiro, J. G. Pinto, B. Exposto, H. Gonçalves, J. C. Ferreira, C. Couto e J. L. Afonso, “Assessment of a Battery Charger for Electric Vehicles with Reactive Power Control,” *IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 5124-5129, 2012.
- [52] General Electric, Technical manual for ocean surveillance ship T-AGOS - Volume 3, 1997.
- [53] US Naval Academy, “Chapter 7 Resistance and Powering of Ships,” [Online]. Available: [https://www.usna.edu/NAOE/\\_files/documents/Courses/EN400/02.07%20Chapter%207.pdf](https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/02.07%20Chapter%207.pdf). [Acedido em 27 agosto 2022].
- [54] J. M. Prousalidis, “The necessity of reactive power balance in ship,” *Journal of Marine Engineering & Technology*, pp. 37-47, 2011.
- [55] Upower ecoline, “Smart-ESS-Micro-Grid,” [Online]. Available: <https://www.upowerbatteries.com/pdfs/Smart-ESS-Micro-Grid.pdf>. [Acedido em 7 agosto 2022].

- [56] Stark New Energy, “1MWH Containerized Lithium Ion Battery Energy Storage System,” [Online]. Available: <https://www.stark-newenergy.com/containerized-energy-storage-system/58616116.html>. [Acedido em 07 agosto 2022].
- [57] Ship-Tenchnology, “Electric ships: the world’s top five projects by battery capacity,” [Online]. Available: <https://www.ship-technology.com/analysis/electric-ships-the-world-top-five-projects-by-battery-capacity/>. [Acedido em 22 agosto 2022].
- [58] Mark Kane, “InsideEVS,” [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/566876/amprius-ships-450whkg-battery-cells/>. [Acedido em 4 agosto 2022].
- [59] H. K. e. al, “Efficiency Estimation of Synchronous Generators for Marine Applications and Verification,” *IEEE Access*, 25 setembro 2020.
- [60] EC. Regulation (EU) 2015/757 of the European Parliament and of the Council of 29 April of 2015, “Monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC, as amended by Commission Delegated Regulation (EU) 2016/2071 of 22 September 2016,” 22 September 2016. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32015R0757&from=EN>; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32016R2071>. [Acedido em 21 Fevereiro 2022].
- [61] V. V. Patel, “Ziegler–Nichols Tuning Method,” *RESONANCE*, vol. 25, pp. 1385-1397, 2020.
- [62] MathWorks, “Introducing the Phasor Simulation Method,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ug/introducing-the-phasor-simulation-method.html>. [Acedido em 22 fevereiro 22].
- [63] Brian Jabeck from Catterpillar , “The Impact Of Generator Set Underloading,” outubro 2013. [Online]. Available: [https://www.cat.com/en\\_US/by-industry/electric-power/Articles/White-papers/the-impact-of-generator-set-underloading.html](https://www.cat.com/en_US/by-industry/electric-power/Articles/White-papers/the-impact-of-generator-set-underloading.html). [Acedido em 25 agosto 2022].

- [64] C. Peng, X. Zhao e G. Liu, “Noise in the Sea and Its Impacts on Marine Organisms,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, pp. 12305-12317, 2015.
- [65] Public Health from Oceancare & Dalhousie University, “The impact of ocean noise pollution on fish and invertebrates,” 2018.
- [66] BloombergNEF, “Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite,” 30 novembro 2021. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>. [Acedido em 26 agosto 2022].
- [67] ESS, “Container Lithium ESS,” [Online]. Available: <https://energetechsolar.com/assets/images/30MWh%20Container%20ESS%20V1.pdf?redirect=1>. [Acedido em 25 agosto 2022].
- [68] Sunpal Power, “BESS 2 Mwh Lithium Ion Batteries Container Solar Energy Storage For Industry,” Made-In-China, [Online]. Available: <https://sunpalpower.en.made-in-china.com/product/cZXtmVioZSkQ/China-BESS-Big-1-Mwh-2-Mwh-Lithium-Ion-Batteries-Container-Solar-Energy-Storage-For-Industry.html>. [Acedido em 25 agosto 2022].
- [69] Cleva Power, “2MWH Lithium Battery Energy Storage System Lithium LiFePO4 High Power Container Battery,” [Online]. Available: <https://www.clevapowerbattery.com/energy-storage-system-ess/2mwh-lithium-battery-energy-storage-system.html>. [Acedido em 25 agosto 2022].
- [70] S. Pribyl, “Decarbonization of shipping – emerging alternative fuels from a US perspective,” 17 fevereiro 2022. [Online]. Available: <https://www.gard.no/web/updates/content/33127327/decarbonization-of-shipping-emerging-alternative-fuels-from-a-us-perspective>. [Acedido em 25 agosto 2022].
- [71] T. data, “Outline of the Mirai,” 2014.
- [72] H. R. a. M. Roser, “CO2 and Greenhouse Gas Emissions,” 2020. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.

## Referências bibliográficas

---

- [73] Radhica, “Ion Energy,” 4 março 2020. [Online]. Available: <https://www.ionenergy.co/resources/blogs/cell-balancing-battery-life/>. [Acedido em 24 janeiro 2022].
- [74] MST, “Development of a Bunker Norm for Ships”.*Cap. 4 Fuel Oils – General Aspects*.
- [75] Caterpillar, “D398 Marine Propulsion Engine Specification Sheet”.
- [76] Sunpal, “Sunpal Power,” [Online]. Available: <https://sunpalpower.en.made-in-china.com/product/cZXtmVioZSkQ/China-BESS-Big-1-Mwh-2-Mwh-Lithium-Ion-Batteries-Container-Solar-Energy-Storage-For-Industry.html>. [Acedido em 4 agosto 2022].
- [77] ESS Container, “Energetech Solar,” [Online]. Available: <https://energetechsolar.com/assets/images/30MWh%20Container%20ESS%20V1.pdf?redirect=1>. [Acedido em 25 setembro 2022].