



POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO TRANSPORTE
MARÍTIMO INTERNACIONAL: UMA ANÁLISE BASEADA EM CENÁRIOS
PARA O CASO DOS NAVIOS-TANQUE DE PETRÓLEO BRUTO

Eduardo Miranda Müller Drumond Casseres

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

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Roberto Schaeffer

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2018

POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO TRANSPORTE
MARÍTIMO INTERNACIONAL: UMA ANÁLISE BASEADA EM CENÁRIOS
PARA O CASO DOS NAVIOS-TANQUE DE PETRÓLEO BRUTO

Eduardo Miranda Müller Drumond Casseres

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

Examinada por:

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof^a. Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.

Prof. Bruno Soares Moreira Cesar Borba, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2018

Casseres, Eduardo Miranda Müller Drumond

Potencial de Mitigação das Emissões de CO₂ do Transporte Marítimo Internacional: uma Análise Baseada em Cenários para o Caso dos Navios-Tanque de Petróleo Bruto/Eduardo Miranda Müller Drumond Casseres. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVI, 169 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 136 – 155.

1. Transporte marítimo internacional. 2. Emissões de CO₂. 3. Navios petroleiros. I. Szklo, Alexandre Salem *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

When you call yourself an Indian, a Muslim, a Christian, a European or anything else, you are being violent. Do you see why it is violent? Because you are separating yourself from the rest of mankind. When you separate yourself by belief, by nationality, by tradition, it breeds violence. So a man who is seeking to understand violence does not belong to any country, to any religion, to any political party or partial system. He is concerned with the total understanding of mankind.

Jiddu Krishnamurti

All that we have invented... the symbols in the church, the rituals, they are all put there by thought. Thought has invented these things. Invented the saviour. Invented the temples (...) Thought has invented all these things called sacred. You cannot deny that. So thought in itself is not sacred. And when thought invents God, God is not sacred. So what is sacred? (...) That can only be understood when there is complete freedom from fear and from sorrow (...) Then, when the mind is utterly still, that which is sacred can take place.

Jiddu Krishnamurti

We but mirror the world. All the tendencies present in the outer world are to be found in the world of our body. If we could change ourselves, the tendencies in the world would also change.

Gandhi

*Love is no big truth
Driven by our genes
We are simple selfish beings*

Erlend Øye e Eirik Glambek Bøe

*Coração de estudante
Há que se cuidar da vida
Há que se cuidar do mundo
Tomar conta da amizade*

Milton Nascimento

*O que eu fiz é muito pouco
Mas é meu e vai comigo*

Paulo Vanzolini

Agradecimentos

À UFRJ por muitos anos de ensino de qualidade e ao CNPq pela bolsa de estudos.

Aos meus orientadores, Alexandre e Roberto, pelas aulas inspiradoras, orientação atenciosa, conhecimento compartilhado e grande cordialidade. Enfim, por dignificarem o ofício do magistério.

À professora Susanne Hoffmann e ao professor Bruno Borba, por se interessarem pelo tema e por aceitarem o convite para a banca avaliadora deste trabalho, ajudando inclusive a encontrar uma data adequada para a defesa.

A todos os docentes do PPE, em especial, ao André Lucena.

Aos funcionários do programa, pela ajuda constante: Josilene de Sousa, Simone Vedovi, Queila Alves, Fernando Moreno, Paulo Feijó e Sandra Bernardo.

A todos os amigos da turma “Evidências”, sem dúvidas, a melhor que já passou pelo PPE. Agradeço especialmente ao Carlos Lopes, por todas as conversas, conselhos e risadas e ao Lucas Carvalho, pela constante preocupação, palavras de conforto e incentivos.

À Giovanna Napolini, amiga com quem compartilhei a intensidade dos meses finais de mestrado (almoços, bibliotecas e “risos pra não chorar”) e a quem agradeço por ter sido essencial para que, em vários momentos, o ânimo voltasse. Espero que eu tenha te ajudado pelo menos a metade do que você me ajudou!

Ao Bruno Cunha e ao Pedro Rochedo, com quem obtive ajuda em diversos momentos. À Marcella Freitas, que me auxiliou com diversas dúvidas, sempre com boa vontade e simpatia.

Aos queridos Otto Hebeda, Isabela Tagomori e Camila Ludovique, pela amizade e ajudas em momentos críticos.

A Suellen Knust, Guilherme Belcastro, Luís Hott, Mariana Fontes e Marianne Zotin, pelos ótimos momentos que passamos juntos, os quais foram fundamentais para aliviar a tensão dos últimos meses.

Aos meus irmãos de sempre, Felipe Lopes, Fernando Tancredo e Gabriel Galvão.

Aos meus outros amigos de infância, especialmente a Laura Barcellos, Gabriel Reis, Bruno Mendonça, Daniel Chueke, Herbert Prince, Isabelle Letouzé, Juliana Pertence, Rafael França e Vitor Fedele.

A toda minha família, pela vontade de ajudar, pelo suporte e por proporcionar momentos de reunião tão bons. Agradeço especialmente a Angélica, Rogério, Julia e Rodrigo por me receberem tão bem em BH mesmo com todas as responsabilidades e ocupações que já têm.

À Flora e à Liz, por existirem!

Ao Jarbas e à Leninha, por serem tão amorosos.

À velha amiga Mônica, por tudo.

Ao Wlamir e à Claudia Nogueira, por serem tão generosos e amáveis.

A meus pais, por tudo que dedicaram à minha formação e pelos diversos momentos em que, ao longo da vida, abriram mão de algo por nós. Pela grande paciência na convivência comigo. Por me apoiarem em qualquer decisão.

Ao meu pai Antonio, pela sabedoria e grande capacidade de escuta.

À minha mãe Silvana, pelo amor irrestrito.

À minha irmã Lívia, pelo senso de compreensão mais profundo que possa existir.

Ao Rafa, pela grande amizade.

À Tainan, por ajudas concretas, pela enorme paciência e pelo carinho constante. Por tudo de bom que me trouxe e traz. Sobretudo, por se dispor a conviver com uma pessoa tão irritante quanto eu. Se a dissertação fosse dedicada a alguém, seria a você, mas não creio que esteja à altura.

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

POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO TRANSPORTE MARÍTIMO INTERNACIONAL: UMA ANÁLISE BASEADA EM CENÁRIOS PARA O CASO DOS NAVIOS-TANQUE DE PETRÓLEO BRUTO

Eduardo Miranda Müller Drumond Casseres

Fevereiro/2018

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Roberto Schaeffer

Programa: Planejamento Energético

Apesar de contribuir de maneira significativa para as emissões de gases de efeito estufa, o transporte marítimo internacional não foi incluído no Acordo de Paris (2015), nova referência das Nações Unidas no âmbito do combate às mudanças climáticas. Caso permaneça sem uma estratégia de mitigação bem definida, o setor, que hoje responde por 2,5% do CO₂eq emitido mundialmente, pode ver suas emissões crescerem mais de 200% até 2050, comprometendo o alcance das metas globais estabelecidas na COP-21. Existe, no entanto, um vasto potencial de mitigação das emissões de CO₂ fóssil no setor marítimo, que envolve tanto medidas incrementais, a exemplo da prática de *slow steaming*, como mudanças estruturais, tais como a transição para combustíveis de baixo teor de carbono. Neste trabalho, avalia-se esse potencial para o caso específico dos navios-tanque de petróleo bruto, que constituem, sob os pontos de vista econômico e energético, uma das mais relevantes categorias do transporte marítimo internacional. Para tanto, recorre-se a uma modelagem *bottom-up* da movimentação de óleo cru nas principais rotas inter-regionais associadas à *commodity*, a partir da qual se desenvolvem sete cenários de consumo de combustíveis e emissões de CO₂. No cenário de referência (C1), as emissões passam de 87 MtCO₂/ano em 2015 para 95 MtCO₂/ano em 2040, com 2,41 GtCO₂ acumuladas ao longo do período. Já no cenário de alta mitigação (C7), o CO₂ emitido anualmente em 2040 é igual a 43 MtCO₂, 55% menor do que no cenário de referência. A redução correspondente nas emissões acumuladas é de 39%.

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

POTENTIAL FOR MITIGATION OF CO₂ EMISSIONS FROM
INTERNATIONAL SHIPPING: A SCENARIO-BASED ANALYSIS FOR THE
CASE OF CRUDE OIL TANKERS

Eduardo Miranda Müller Drumond Casseres

February/2018

Advisors: Alexandre Salem Szklo
Roberto Schaeffer

Department: Energy Planning

Despite being a major contributor to greenhouse gases emissions, international shipping was left out of the Paris Agreement (2015), which is United Nations' new guideline within the fight against climate change. In the absence of a clear mitigation strategy, the sector's emissions, which currently account for 2,5% of global CO₂eq, may undergo an increase of over 200% until 2050, jeopardizing the achievement of the goals set at COP-21. There is, however, a vast potential for mitigation of fossil CO₂ emissions in the maritime sector, which cover both incremental changes, such as slow steaming, and structural changes, *e.g.*, transition to low-carbon fuels. In this work, this potential is evaluated for the specific case of crude oil tankers, which constitute, from an economic and energy point of view, one of the most important categories of international maritime transport. For this purpose, we perform a bottom-up modelling of the main crude petroleum trade routes, from which seven fuel consumption and CO₂ emissions scenarios are derived. In the reference scenario (C1), emissions increase from 87 MtCO₂ per year in 2015 to 95 MtCO₂ per year in 2040, with 2,41 GtCO₂ accumulated over the period. In the high-mitigation scenario (C7), 43 MtCO₂ are emitted annually in 2040. This value is 55% lower than the annual emissions of the baseline scenario in the same year. The corresponding reduction in cumulative emissions is 39%.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Contexto e relevância do tema	1
1.2 Objetivos e estrutura	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.2.3 Estrutura da dissertação	3
2 Transporte Marítimo Internacional e Emissões de CO₂	4
2.1 Contribuição dos transportes para as emissões de gases estufa	5
2.2 O comércio marítimo e a economia global	7
2.3 Combustíveis marítimos: dependência fóssil	9
2.3.1 Motores principais	9
2.3.2 Motores auxiliares	11
2.3.3 Caldeiras auxiliares	12
2.4 Transporte marítimo e gases estufa	13
2.4.1 Eficiência de carbono do transporte hidroviário	13
2.4.2 Emissões do transporte marítimo internacional	14
2.4.3 Navios petroleiros	16
3 Mitigação das Emissões do Transporte Marítimo Internacional	20
3.1 Histórico e estágio atual	20
3.1.1 A política de eficiência energética da IMO	21
3.2 <i>Slow steaming</i>	24
3.2.1 Definição e histórico	24
3.2.2 Benefícios e inconvenientes	26
3.3 Gás natural liquefeito (GNL)	30
3.4 Biocombustíveis	32
3.4.1 Contexto do setor de transportes	32

3.4.2	Biocombustíveis no setor marítimo	34
4	Metodologia de Cenarização das Emissões de Navios Petroleiros	36
4.1	Projeção do <i>trade</i> marítimo de petróleo	38
4.1.1	Mapeamento e seleção das rotas	38
4.1.2	Projeção do <i>trade</i> por rota	45
4.2	Caracterização das rotas marítimas de comércio de petróleo	50
4.2.1	Portos de referência e cálculo de distâncias	50
4.2.2	Definição da categoria de petroleiro por rota	54
4.3	Premissas de evolução da frota	57
4.3.1	Frota em 2015	58
4.3.2	Evolução do número total de navios	61
4.3.3	Entrada de novos navios	62
4.3.4	Distribuição dos navios pelas rotas	64
4.4	Cenário de referência	65
4.4.1	Caracterização das categorias de petroleiros	66
4.4.2	Hipóteses de distinção das viagens	69
4.4.3	Velocidade	70
4.4.4	Resistência ao avanço e propulsão	71
4.4.5	Validação	76
4.4.6	Consumo de combustível	77
4.4.7	Emissões de CO ₂	83
4.5	Cenários alternativos	84
4.5.1	Cenário 2 (contrafactual)	84
4.5.2	Cenário 3 (<i>slow steaming</i>)	85
4.5.3	Cenário 4 (<i>extra slow steaming</i>)	86
4.5.4	Cenário 5 (transição para GNL)	87
4.5.5	Cenário 6 (transição para biocombustíveis)	88
4.5.6	Cenário 7 (alta mitigação)	89
5	Resultados e Discussão	90
5.1	Comércio internacional de petróleo	91
5.2	Consumo de combustível e emissões de CO ₂	95
5.2.1	Cenário 1	98
5.2.2	Cenário 2	100
5.2.3	Cenário 3	102
5.2.4	Cenário 4	104
5.2.5	Cenário 5	106
5.2.6	Cenário 6	108
5.2.7	Cenário 7	110

5.3	Emissões por origem e destino	112
5.4	Efetividade da política de eficiência da IMO	114
5.5	Regimes de velocidade	116
5.6	Disponibilidade de combustíveis alternativos	119
5.6.1	Gás natural liquefeito (GNL)	119
5.6.2	Biocombustíveis	123
6	Considerações Finais	126
6.1	Principais conclusões	126
6.2	Abrangência e utilidade	132
6.3	Limitações da metodologia	133
6.4	Sugestões para trabalhos futuros	135
	Referências Bibliográficas	136
A	Princípios básicos de resistência ao avanço e propulsão	156
A.1	Principais grandezas e dimensões em uma embarcação	156
A.1.1	Deslocamento e porte	156
A.1.2	Geometria da embarcação (dimensões lineares)	158
A.1.3	Coefficientes	159
A.2	Resistência ao avanço	161
A.2.1	Resistência friccional (R_F)	161
A.2.2	Resistência residual (R_R)	161
A.2.3	Resistência do ar (R_A)	162
A.2.4	Resistência total e potência efetiva de reboque	162
A.3	Propulsão	163
A.3.1	Condições de escoamento em torno do propulsor (w)	163
A.3.2	Coefficiente de redução da força propulsora (t)	163
A.3.3	Eficiências	164
B	Detalhamento de dados e resultados	166

Lista de Figuras

2.1	Emissões globais de gases de efeito estufa por setor em 2010	5
2.2	Fontes de energia primária por modal	6
2.3	Índices de comércio mundial, comércio marítimo e PIB global	7
2.4	Comércio marítimo internacional por tipo de carga	8
2.5	Esquema básico da conversão energética na propulsão naval	9
2.6	Esquema simplificado de refinaria <i>straight-run</i>	10
2.7	Esquema simplificado da utilização de motores auxiliares	11
2.8	Perfil operacional das caldeiras	12
2.9	Emissões de CO ₂ por tonelada-quilômetro de acordo com modal	13
2.10	Emissões de CO ₂ por tonelada-quilômetro por tipo de embarcação	14
2.11	Emissões de GEE no setor marítimo mundial entre 2007 e 2012	15
2.12	Ranking dos maiores emissores de GEE e emissões do TMI	15
2.13	Emissões de CO ₂ do TMI por classe de navio em 2012	17
2.14	Emissões de CO ₂ de petroleiros entre 2007 e 2012	19
2.15	Consumo de combustível nas principais classes de navios (2012)	19
3.1	Linha de base para cálculo do EEDI em navios-tanque	22
3.2	Fatores de redução aplicáveis a diferentes categorias	23
3.3	Consumo de combustível como função da velocidade - navio mineraleiro	24
3.4	Taxa de frete para VLCCs (contrato de um ano)	25
3.5	Emissões de CO ₂ do setor marítimo entre 2007 e 2012	26
3.6	Duração da viagem Brasil-China para um petroleiro Suezmax	28
3.7	Preço do HFO e do ULSFO no porto de Roterdã	31
3.8	Projeção do consumo mundial anual de biocombustíveis	33
3.9	Panorama não exaustivo das rotas de produção de biocombustíveis	33
4.1	Fluxograma do procedimento metodológico	37
4.2	Principais fluxos inter-regionais de petróleo em 2015	39
4.3	Desagregação do fluxo Américas Central e do Sul - EUA em duas rotas	43
4.4	Evolução do <i>trade</i> em rotas selecionadas	49
4.5	Portos de origem da rota 28	50

4.6	Percentual de petroleiros em cada categoria em 2012	58
4.7	Perfil etário da frota de petroleiros em 2015	59
4.8	Curva de sobrevivência para navios petroleiros acima de 5.000 dwt	60
4.9	Sobrevivência dos navios existentes em 2015 ao longo dos anos	60
4.10	Principais dimensões de um navio	66
4.11	Coefficiente de peso leve como função do porte bruto, VLCCs	68
4.12	Relação entre velocidade praticada e velocidade de projeto	70
4.13	Parte aérea e parte submersa da seção transversal de um navio	73
4.14	Eficiência de águas abertas como função do coeficiente de avanço	75
4.15	Validação das potências encontradas por comparação com SMCR	76
4.16	Potência de freio e consumo específico	77
4.17	Consumo específico de novos navios - cenário contrafactual	84
4.18	Razão entre velocidades real e de projeto - <i>slow steaming</i>	85
4.19	Razão entre velocidades real e de projeto - <i>extra slow steaming</i>	86
4.20	Aumento percentual do tamanho da frota nos cenários C3 e C4	86
4.21	Proporção de novos navios contendo motores aptos a utilizar GNL	87
4.22	Percentual de navios utilizando SVO no motor principal	88
4.23	Percentual de biodiesel no diesel marítimo	89
5.1	Evolução do comércio internacional de petróleo por via marítima	91
5.2	Repartição das importações de petróleo por grupo econômico	92
5.3	Gargalos marítimos do comércio internacional de petróleo	93
5.4	Evolução do fluxo diário de petróleo através de Ormuz e Málaca	94
5.5	Principais terminais de petróleo na Península Arábica	94
5.6	Evolução das emissões anuais de CO ₂ nos sete cenários	96
5.7	Emissões acumuladas de CO ₂ nos sete cenários	97
5.8	Percentual de emissões evitadas em relação ao cenário de referência	97
5.9	Consumo de combustíveis - cenário 1	98
5.10	Emissões de CO ₂ - cenário 1	99
5.11	Crescimento percentual das emissões por período - cenário 1	99
5.12	Consumo de combustíveis - cenário 2	100
5.13	Emissões de CO ₂ - cenário 2	101
5.14	Crescimento percentual das emissões por período - cenário 2	101
5.15	Consumo de combustíveis - cenário 3	102
5.16	Emissões de CO ₂ - cenário 3	103
5.17	Crescimento percentual das emissões por período - cenário 3	103
5.18	Consumo de combustíveis - cenário 4	104
5.19	Emissões de CO ₂ - cenário 4	105
5.20	Crescimento percentual das emissões por período - cenário 4	105

5.21	Consumo de combustíveis - cenário 5	106
5.22	Emissões de CO ₂ - cenário 5	107
5.23	Crescimento percentual das emissões por período - cenário 5	107
5.24	Consumo de combustíveis - cenário 6	108
5.25	Emissões de CO ₂ - cenário 6	109
5.26	Crescimento percentual das emissões por período - cenário 6	109
5.27	Consumo de combustíveis - cenário 7	110
5.28	Emissões de CO ₂ - cenário 7	111
5.29	Crescimento percentual das emissões por período - cenário 7	111
5.30	Emissões de CO ₂ por região de origem (cenário 1)	112
5.31	Emissões de CO ₂ por região de destino (cenário 1)	113
5.32	Percentual de navios <i>compliant</i> s com EEDI-2025 por categoria	115
5.33	Evolução da frota de petroleiros de acordo com regime de velocidade	116
5.34	Repartição das emissões por fonte em 2040	117
5.35	Demanda por GNL no cenário 5	119
5.36	Produção de gás natural por região em 2016	120
5.37	Plantas de liquefação de gás no mundo	121
5.38	Capacidade de liquefação por país	121
5.39	Demanda por SVO e biodiesel no cenário 6	123
5.40	Produção mundial de óleo vegetal por tipo no ciclo 2016-2017	124
5.41	Produção de biodiesel por país em 2016	124
A.1	Deslocamento leve e peso morto	157
A.2	Dimensões do casco (vista lateral)	158
A.3	Dimensões do casco (corte transversal)	159
A.4	Potência de freio e eficiências	164

Lista de Tabelas

3.1	Redução de velocidade em diferentes níveis de <i>slow steaming</i>	26
3.2	Tipos de bunker por teor de enxofre	30
3.3	Matriz de compatibilidade técnica entre biocombustíveis e motores	34
4.1	Movimentos de óleo cru excluídos da análise por não envolverem, por hipótese, utilização do transporte marítimo	38
4.2	Cálculo dos fluxos inter-regionais e intra-regionais (números em Mt)	41
4.3	As 37 principais rotas marítimas de comércio de petróleo bruto em 2015	42
4.4	Projeção da demanda de petróleo bruto por região	46
4.5	Projeção da oferta de líquidos por região	46
4.6	Projeção da demanda líquida para os principais importadores	47
4.7	As sete rotas envolvendo importações da China em 2015	48
4.8	Projeção das exportações por rotas tendo como destino a China	48
4.9	Portos de referência para exportação	51
4.10	Portos de referência para importação	51
4.11	Distâncias entre portos de referência	53
4.12	Categorias de navios petroleiros	54
4.13	Categoria de petroleiro associada a cada rota	56
4.14	Número de navios por categoria em 2015	59
4.15	Evolução da frota Suezmax no caso do exemplo proposto	62
4.16	Cálculo do número de navios Suezmax de acordo com o ano de entrada em operação para o caso do exemplo proposto	63
4.17	Evolução da proporção de navios Suezmax de cada período no caso do exemplo proposto	63
4.18	Dimensões de VLCCs de diferentes portes	67
4.19	Definição dos navios típicos por categoria	67
4.20	Peso leve de cada navio de acordo com a análise estatística	68
4.21	Resultados da modelagem energética	75
4.22	Fatores de redução do EEDI requisitados pela IMO (navios-tanque)	78
4.23	Potência auxiliar demandada de acordo com modo operacional	79

4.24	Tempo atracado e tempo ancorado	80
4.25	Perfil de operação da caldeira de acordo com o tipo de petroleiro . . .	82
4.26	Fatores de emissão (g CO ₂ /g combustível)	83
B.1	Movimentos inter-regionais de óleo cru em 2015	167
B.2	Emissões de CO ₂ - cenário 1	168
B.3	Emissões de CO ₂ - cenário 2	168
B.4	Emissões de CO ₂ - cenário 3	168
B.5	Emissões de CO ₂ - cenário 4	169
B.6	Emissões de CO ₂ - cenário 5	169
B.7	Emissões de CO ₂ - cenário 6	169
B.8	Emissões de CO ₂ - cenário 7	169

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e relevância do tema

A importância econômica do transporte marítimo internacional (TMI) é indiscutível: estima-se que 90% dos bens comercializados mundialmente passem, em algum ponto de sua cadeia logística, por mares ou oceanos. Navios cargueiros são, de longe, o mais eficiente e econômico meio de transporte de carga, sobretudo quando se trata da movimentação de grandes volumes de matérias-primas e *commodities* [1].

Ocorre que, assim como o restante do setor de transportes, o modal hidroviário é fortemente dependente de combustíveis de alto teor de carbono: via de regra, a geração de energia mecânica, elétrica e térmica em navios mercantes baseia-se na combustão de derivados de petróleo [2], processo do qual resultam emissões de dióxido de carbono (CO_2) e de outros gases de efeito estufa (GEE), cuja acumulação na atmosfera terrestre é extremamente nociva do ponto de vista climatológico [3].

De fato, as emissões antropogênicas de GEE, provenientes não apenas da queima de combustíveis fósseis mas também de processos industriais, atividades agrícolas e mudanças no uso do solo, guardam forte relação com o extraordinário aumento da temperatura média global observado nas últimas décadas, que constitui um grave e inédito problema ambiental [3].

O aquecimento global é, mais do que nunca, uma realidade: o aumento do grau de certeza quanto à influência humana e os repetidos alertas da comunidade científica sobre as possíveis proporções das consequências do fenômeno fizeram com que, nos últimos anos, o assunto fosse tratado com maior seriedade pelos organismos internacionais [4].

Nesse sentido, a Conferência das Nações Unidas (ONU) sobre as Mudanças Climáticas de 2015 (COP-21) consistiu em um importante marco histórico já que, na referida reunião, houve sucesso, pela primeira vez, no estabelecimento de um acordo global para o enfrentamento das mudanças climáticas (Acordo de Paris) [5].

No entanto, infelizmente, o transporte marítimo internacional não foi contemplado por tal acordo. Ao contrário do que acontece com as demais atividades econômicas, as emissões do transporte marítimo internacional não ocorrem no território de um Estado específico, mas em águas internacionais. A adoção de um critério para alocação dessas emissões não é trivial e essa particularidade fez com que o setor, assim como a aviação internacional, ficasse fora do Acordo de Paris, tendo a tutela do problema permanecido nas mãos da Organização Marítima Internacional (IMO), agência especializada da ONU para regulação da navegação comercial [6].

Acontece que a atuação da IMO frente ao desafio de descarbonização da atividade marítima não tem ocasionado avanços significativos. A possibilidade de se implementar medidas baseadas em mercado (MBMs), por exemplo, foi discutida desde o início dos anos 2000 no âmbito da agência, tendo sido suspensa na 65^a reunião do Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho (MEPC), em 2013 [7]. Até aqui, a maior contribuição da IMO para a pauta das mudanças climáticas foi o desenvolvimento de um índice de eficiência energética (*Energy Efficiency Design Index*, EEDI)¹ cujas metas de redução tornaram-se obrigatórias a partir do MEPC-62, em 2011 [8]. A efetividade do impacto dessa política é, contudo, bastante questionável [9].

Em suma, pode-se dizer que o setor marítimo internacional está bastante atrasado no tocante à mitigação das mudanças climáticas. Assim, a atual perspectiva da trajetória de emissões do setor não é nada animadora: além de haver uma tendência de intensificação do comércio marítimo internacional nas próximas décadas, e portanto, da demanda por energia fóssil pelo setor, planos de ação e estratégias para a limitação do crescimento dos níveis de emissão associados praticamente inexistem.

¹Apesar da denominação dada pela agência, trata-se, na realidade, de um índice de eficiência de carbono.

1.2 Objetivos e estrutura

1.2.1 Objetivo geral

Diante do preocupante cenário de crescimento da atividade comercial inter-regional nas próximas décadas e considerando-se a ausência, até aqui, de uma estratégia robusta de descarbonização do setor marítimo internacional, estudam-se, neste trabalho, as diferentes alternativas para redução das emissões de CO₂ do TMI, apontando-se as vantagens e inconvenientes de cada medida mitigadora, bem como as principais barreiras à sua implementação.

Nesse sentido, pode-se dizer que o objetivo geral desta dissertação é a avaliação teórica do potencial de mitigação das emissões de CO₂ do setor marítimo internacional como um todo, com vistas a encorajar a formulação de políticas que efetivamente promovam uma queda da contribuição do setor para o aquecimento global.

1.2.2 Objetivos específicos

O objetivo geral descrito na subseção 1.2.1 concentra-se no aspecto teórico da mitigação das emissões. O escopo da dissertação, entretanto, não se limita a tal análise, pois se desenvolvem também investigações quantitativas. Eis, portanto, os objetivos específicos do trabalho:

- desenvolvimento de uma metodologia de avaliação das possíveis trajetórias das emissões do transporte marítimo internacional nas próximas décadas;
- aplicação desta metodologia ao caso específico dos navios-tanque de petróleo bruto, de maneira verificar os impactos das medidas mitigadores sobre esta classe de embarcações.

1.2.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: após este breve capítulo introdutório, seguem-se cinco outros. No capítulo 2, apresenta-se o contexto do problema, discutindo-se a importância do transporte marítimo e o peso de suas emissões de GEE. Em seguida, no capítulo 3, trabalha-se o objetivo geral da dissertação, ou seja, analisam-se, do ponto de vista teórico, as diferentes opções de mitigação das emissões de CO₂ no âmbito do TMI. O capítulo 4 relaciona-se aos objetivos específicos: nele, propõe-se uma metodologia de cenarização das emissões de navios mercantes internacionais, a partir do caso específico de navios petroleiros. No capítulo 5, discutem-se os resultados obtidos a partir dessa aplicação do modelo de cenários e no capítulo 6, tecem-se alguns comentários finais.

Capítulo 2

Transporte Marítimo Internacional e Emissões de CO₂

O consenso científico sobre a contribuição das atividades humanas para as mudanças climáticas é praticamente absoluto: o aquecimento do sistema climático é evidente e as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa atingiram níveis muito elevados nos últimos anos, fazendo com que as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) tenham atingido seus valores mais altos em pelo menos 800 milênios [3].

O setor de transportes, largamente dependente de fontes fósseis de energia, é responsável por uma parcela significativa das emissões anuais de GEE. Apesar de as emissões dos transportes serem dominadas pelo setor rodoviário, o peso das contribuições dos modais aeroviário e hidroviário é extremamente significativo [10].

Neste capítulo, discute-se a dimensão atual e as perspectivas de crescimento das emissões de CO₂ do transporte marítimo internacional, cuja mitigação encontrou um obstáculo adicional no fato de o setor não ter sido contemplado pelo Acordo de Paris de 2015 [11].

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 2.1, propõe-se uma breve contextualização acerca da íntima relação entre combustíveis fósseis e transportes, que está na origem da relevante contribuição do setor para o aquecimento global. Na seção 2.2, discute-se o papel determinante do transporte marítimo internacional como um elo da economia global. Na seção 2.3, apresentam-se as fontes de energia por trás desse importante motor da globalização, *i.e.*, os combustíveis marítimos. Na seção 2.4, analisa-se a eficiência de carbono do modal hidroviário e avalia-se a relevância do montante atual de emissões anuais do TMI, bem como sua preocupante situação regulatória, que pode levá-lo a experimentar um crescimento bem maior do que outras atividades. Comenta-se ainda o protagonismo exercido pelos navios petroleiros, pelos quais nos interessamos especialmente neste trabalho, em termos de emissões de CO₂.

2.1 Contribuição dos transportes para as emissões de gases estufa

O setor de transportes constitui uma das principais fontes antropogênicas de emissão de gases de efeito estufa. Em 2010, de acordo com o AR5¹ do IPCC [12], os transportes foram responsáveis por 14,4 % das emissões mundiais de GEE², o que equivale a 7,1 GtCO₂eq (figura 2.1).

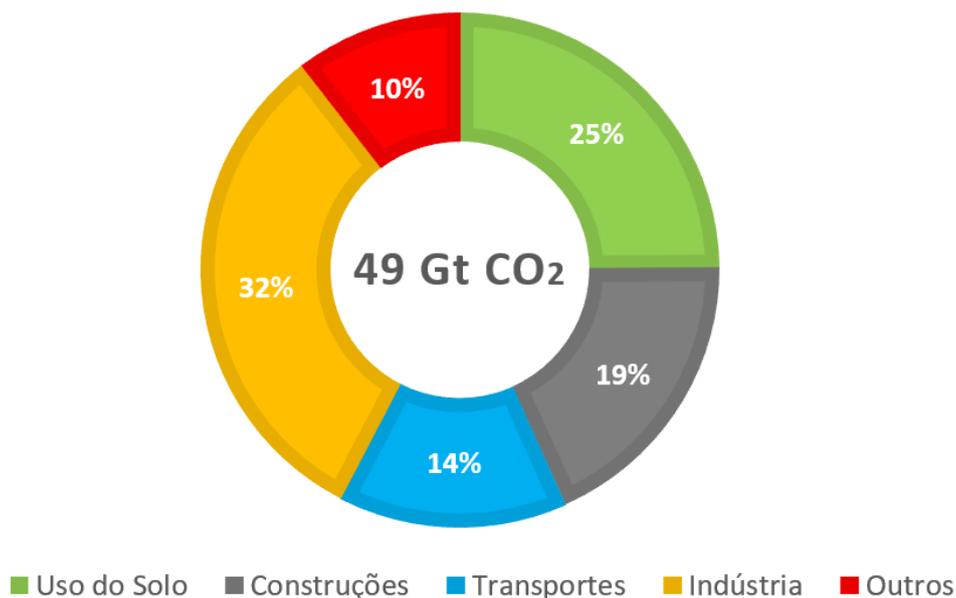


Figura 2.1: Emissões globais de gases de efeito estufa por setor em 2010
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [12]

A razão pela qual os transportes estão na origem de significativa parcela da poluição global emitida anualmente é sua forte dependência em relação aos derivados de petróleo, conforme ilustra a figura 2.2³, referente ao ano de 2009, em que “OPBQ” representa o grupo “óleos pesados, biocombustíveis e querosene”. Conforme ilustra o gráfico, os produtos de óleo cru são a fonte de aproximadamente 95% da energia primária do setor⁴. Nesse contexto, destacam-se a gasolina (39 EJ) e o óleo diesel (32 EJ) [10].

¹ *Fifth Assessment Report*, o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, a mais recente atualização das atividades do IPCC.

² O número refere-se à soma de emissões diretas (14,1%) e indiretas (0,3%) do setor.

³ Os números da figura 2.2 estão em exajoule, 1 EJ = 10¹⁸ J.

⁴ Cálculo aproximado, descontando-se arbitrariamente 5 EJ referentes aos biocombustíveis dos 20 EJ do grupo “óleo pesado, biocombustíveis e querosene”.

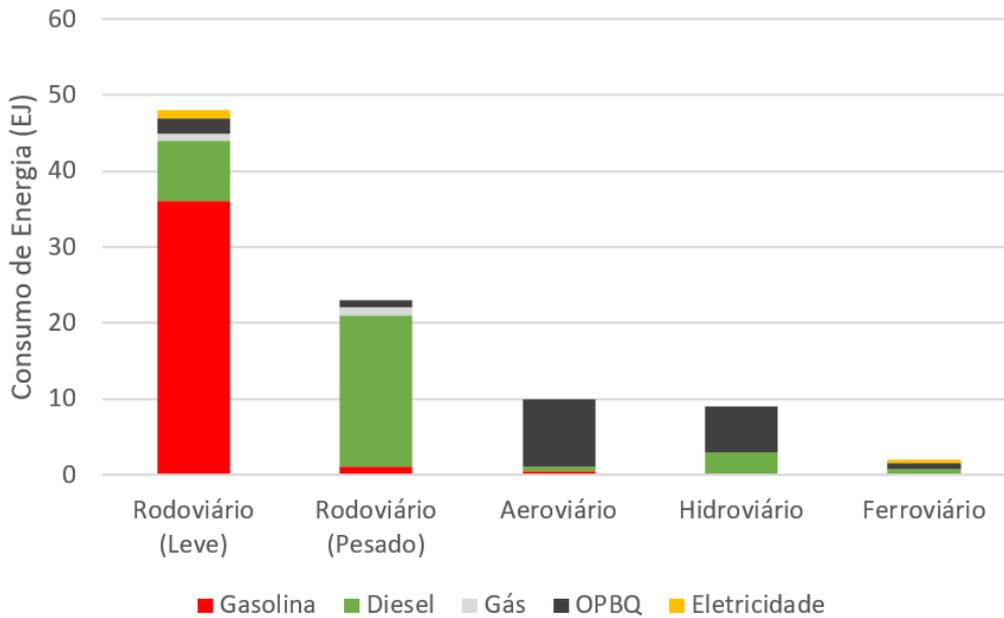


Figura 2.2: Fontes de energia primária por modal
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [10]

A redução do montante anual global de emissões de GEE nesse campo é um desafio, não apenas devido aos elevados níveis atuais, mas também pela tendência de aumento da demanda por transporte de passageiros e de carga, que pode superar o efeito de eventuais medidas de mitigação e efficientização [10]. Na ausência de políticas agressivas e duradouras, as emissões poderiam, nas próximas décadas, crescer a uma taxa superior às de outros setores, alcançando 12 GtCO₂eq/ano em 2050 [10].

Existe, no entanto, um vasto potencial de mitigação dessas emissões, que abarca mudanças comportamentais, absorção de tecnologias de maior eficiência, uso de combustíveis de baixo carbono, investimentos em infraestrutura e mudanças no ambiente construído. Para que haja um bom aproveitamento desse potencial, a fim de alcançar uma substancial redução no montante anual de emissões do setor de transportes, é essencial que sejam combinadas estratégias de curto e longo prazo [10].

2.2 O comércio marítimo e a economia global

A importância do transporte marítimo como meio para conexão comercial de povos remonta à Antiguidade: evidências sugerem que a navegação mercante exista há mais de dois milênios. Foi apenas a partir da Era dos Descobrimentos, contudo, que o comércio marítimo ganhou caráter global: com as viagens de Vasco da Gama, Cristóvão Colombo, John Cabot, Zheng He e outros, rotas comerciais totalmente novas foram criadas, mudando definitivamente a história econômica do planeta [13].

Hoje, o transporte marítimo é a espinha dorsal do mercado internacional, responsável pela movimentação de aproximadamente 90% dos produtos comercializados em todo o mundo, constituindo portanto uma das mais fundamentais dimensões da globalização. Sendo o mais econômico meio de transporte internacional de mercadorias, é um facilitador “invisível” do comércio a nível mundial: tendo em vista o caráter global do setor e o fato de que os navios passam a maior parte do tempo em águas internacionais, a atividade mercante marítima passa frequentemente despercebida na vida cotidiana daqueles que dela se beneficiam. Entretanto, sua importância torna-se evidente quando se considera, por exemplo, que dela dependem a segurança alimentar global e o suprimento da demanda energética de inúmeros países [1].

A figura 2.3⁵ explicita a relação entre o comércio marítimo e a economia global: embora a relação entre produção econômica e o comércio de mercadorias pareça estar mudando (diminuição da razão *Trade/PIB*), a demanda por transporte marítimo permanece fortemente ligada ao desempenho da economia global [14].

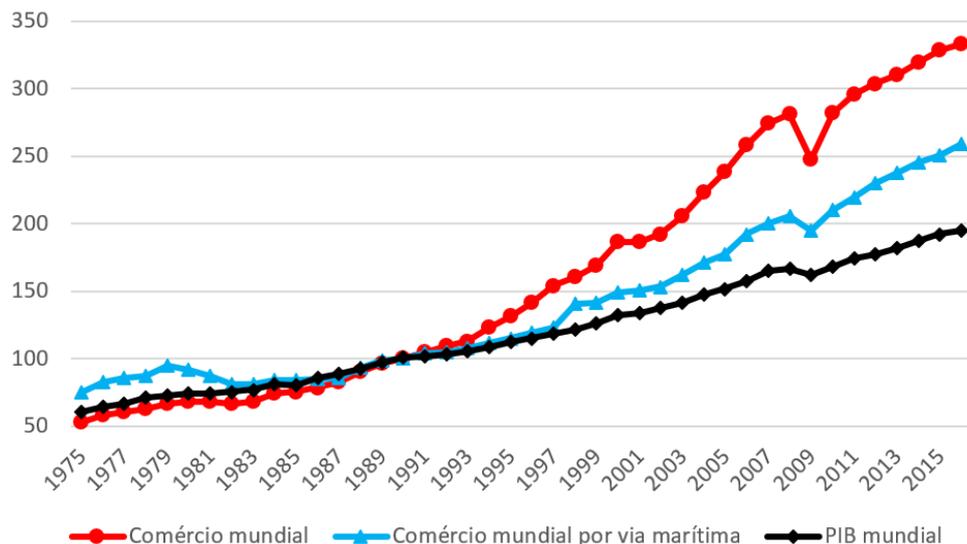


Figura 2.3: Índices de comércio mundial, comércio marítimo e PIB global

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [14]

⁵Os índices baseiam-se em dólares (comércio de mercadorias e PIB) ou toneladas (comércio marítimo). Considera-se que os índices são iguais a 100 em 1990.

Embora a utilização de contêineres tenha crescido substancialmente ao longo dos últimos vinte anos, o transporte marítimo ainda está fortemente vinculado ao *trade de commodities*: conforme mostra a figura 2.4, em termos de massa transportada, mais de 60% do comércio internacional refere-se à movimentação de granéis sólidos e líquidos, cargas que tipicamente envolvem grandes volumes e têm baixo valor agregado [14].

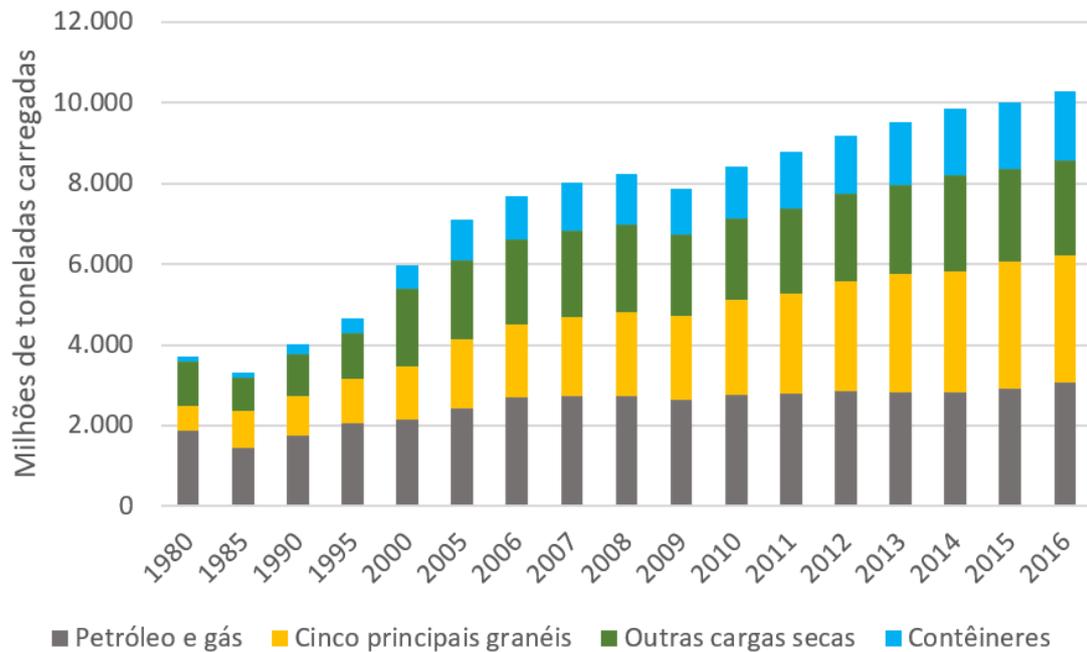


Figura 2.4: Comércio marítimo internacional por tipo de carga
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [14]

Os cinco principais granéis secos (*dry bulks*) a que se refere a figura são

- minério de ferro,
- grãos (soja, trigo, arroz, etc.),
- carvão,
- bauxita,
- e fosfato.

Dentre os granéis líquidos (*liquid bulks*), destacam-se

- petróleo e seus derivados;
- gás natural.

2.3 Combustíveis marítimos: dependência fóssil

2.3.1 Motores principais

Desde a Antiguidade e sobretudo a partir da Era dos Descobrimentos, a propulsão marítima teve o recurso eólico, sob a forma de velas, como principal fonte energética [15]. A Era das Velas durou até o começo do século XIX, quando surgiram, no contexto da Revolução Industrial, os primeiros navios a vapor, marcando o início da utilização da combustão de recursos minerais para fins propulsivos [2]. O carvão mineral prevaleceu até meados do século XX, quando passou a gradualmente perder espaço para o motor de combustão interna (MCI), o que se deveu principalmente à vantagem dos derivados do petróleo sobre o carvão em termos de densidade energética [16]. Assim, desde os anos 1960, o setor naval tornou-se crescentemente dependente de petróleo. No começo do século XXI, 98% da frota mercante mundial era composta por navios a MCI [2].

De maneira geral, a conversão energética em grandes navios mercantes ocorre conforme mostra a figura 2.5: um motor Diesel, alimentado por óleos residuais de alta viscosidade, fornece energia mecânica ao eixo de um hélice (*propeller*), cuja rotação confere ao navio a potência necessária para locomoção [17].

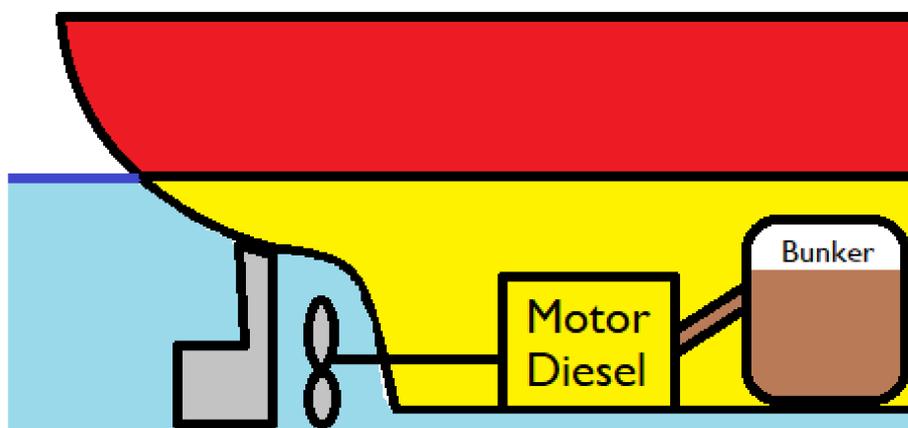


Figura 2.5: Esquema básico da conversão energética na propulsão naval

Fonte: Elaboração própria

Ao motor associado à propulsão costuma-se atribuir a denominação motor principal. Os motores principais baseiam-se na ignição por compressão e trabalham a dois tempos⁶ [19]. Na aplicação naval, motores de dois tempos têm diversas vantagens em relação aos motores de quatro tempos, entre as quais maior confiabilidade operacional, manutenção menos frequente e melhor relação peso/potência [20].

⁶Em oposição ao que ocorre em motores de quatro tempos, as etapas de funcionamento de um motor a dois tempos não ocorrem de forma bem demarcada, havendo admissão e exaustão de gases ao mesmo tempo [18].

Entretanto, o benefício determinante para a prevalência dos motores de dois tempos sobre os de quatro tempos diz respeito à flexibilidade em relação à seleção de combustíveis: tais motores são capazes de trabalhar com óleos residuais de baixa qualidade (portanto, mais baratos), o que reduz sensivelmente os custos de operação dos armadores (tal ganho compensa o alto custo de instalação das plantas de propulsão de dois tempos) [20].

A esse combustível residual utilizado em motores principais de navios de grande porte dá-se o nome de bunker. O bunker é produzido a partir dos resíduos da destilação atmosférica do óleo cru (figura 2.6), ou seja, tem origem em formulações contendo principalmente frações pesadas do petróleo [21].



Figura 2.6: Esquema simplificado de refinaria *straight-run*

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [2]

Na realidade, a composição do bunker (ao qual nos referiremos também pela sigla HFO, do inglês *Heavy Fuel Oil*⁷) é muito semelhante à dos óleos combustíveis industriais. No entanto, os requisitos de qualidade para utilização de um combustível em MCIs são bastante diferentes daqueles necessários no caso do emprego em fornos e caldeiras e, assim, o bunker possui algumas particularidades [23]. As principais exigências técnicas em relação à qualidade do HFO são [21]

- nebulização adequada para garantir combustão completa;
- qualidade de ignição, de modo a evitar danos ao motor Diesel;
- facilidade de escoamento a baixas temperaturas.

⁷A rigor, a denominação bunker refere-se a toda a gama de combustíveis marítimos, incluindo portanto as diferentes misturas de frações destiladas e residuais, tais como o MDO (*Marine Diesel Oil*) e o IFO (*Intermediate Fuel Oil*) [22]. Não obstante, o tipo de óleo bunker mais comumente utilizado é justamente o HFO e assim, a partir deste ponto, utilizam-se os dois termos como sinônimos.

2.3.2 Motores auxiliares

Apesar de ser a principal, a propulsão não é única demanda energética de um grande navio mercante. A geração de eletricidade, por exemplo, é absolutamente essencial para suprir a demanda de equipamentos como bombas, sistemas de ventilação e sistemas de emergência [24].

Normalmente, a potência elétrica utilizada a bordo de uma embarcação é produzida por geradores conectados a motores de combustão interna conhecidos como motores auxiliares (figura 2.7). Assim como no caso dos sistemas de propulsão, os motores auxiliares trabalham de acordo com o ciclo Diesel. Entretanto, ao contrário do que ocorre em sistemas principais, trata-se predominantemente de motores a quatro tempos de alta velocidade de rotação. Apesar de esses equipamentos exigirem um combustível mais caro, os volumes envolvidos são bem mais discretos, adequando-se perfeitamente a tal utilização, já que requerem menos espaço e possuem menor custo de instalação [25].

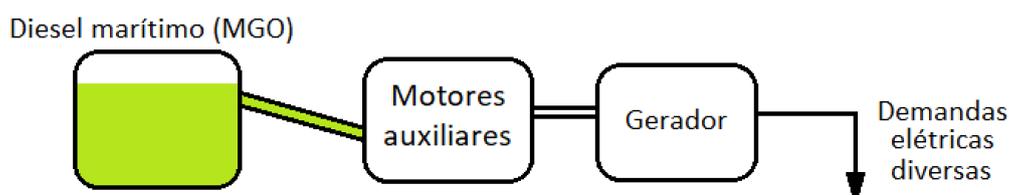


Figura 2.7: Esquema simplificado da utilização de motores auxiliares

Fonte: Elaboração própria

O funcionamento de motores auxiliares baseia-se na combustão de diesel marítimo (*marine gasoil*, MGO)⁸ que, ao contrário do bunker, é composto por formulações contendo exclusivamente frações destiladas do petróleo [21]. Os requisitos de qualidade do MGO, que é produzido a partir de gasóleos atmosféricos, são bastante semelhantes aos do óleo diesel automotivo. No entanto, por ser utilizado em motores de porte superior aos de veículos rodoviários, o MGO apresenta menor exigência em relação à cetanagem⁹. Por outro lado, por questões de segurança, os requisitos relativos ao ponto de fulgor¹⁰ são mais estritos para o diesel marítimo [21].

⁸É preciso fazer a distinção entre *Marine Gas Oil* (MGO) e *Marine Diesel Oil* (MDO): enquanto o primeiro consiste em um combustível que provém exclusivamente de frações destiladas, o MDO é um *blend* de MGO com HFO, tendo, portanto, menor qualidade [22]. Inconvenientemente, a tradução de *Marine Gas Oil* remete ao MDO: diesel marítimo.

⁹O número de cetano indica a qualidade da combustão em motores de ciclo Diesel.

¹⁰Ponto de fulgor ou ponto de inflamação é a menor temperatura que provoca vaporização de dado líquido a ponto de este formar uma mistura inflamável com o ar.

2.3.3 Caldeiras auxiliares

O consumo de energia em grandes navios não se limita à propulsão e à eletricidade: existe também uma demanda por calor, sob a forma de vapor. O vapor quente é utilizado para aquecer o combustível¹¹ e algumas cargas mas também para acionar bombas a vapor quando da execução de certas operações de carga e descarga [26].

Durante o período em curso, os navios geralmente aproveitam o calor residual da combustão do motor principal: em altas cargas, a geração de vapor ocorre a partir da troca de calor com o exausto criado pela queima do bunker. Nesse caso, utilizam-se caldeiras de recuperação [26].

No entanto, nem sempre o calor proveniente do motor principal é suficiente: em baixas cargas ou com o navio atracado, é necessária a ativação de caldeiras auxiliares, em que se queima óleo combustível (bunker) exclusivamente para gerar vapor. Conforme ilustra a figura 2.8, a faixa de transição entre caldeiras de recuperação e caldeiras auxiliares situa-se entre 20 e 50% da carga nominal do motor principal [27].

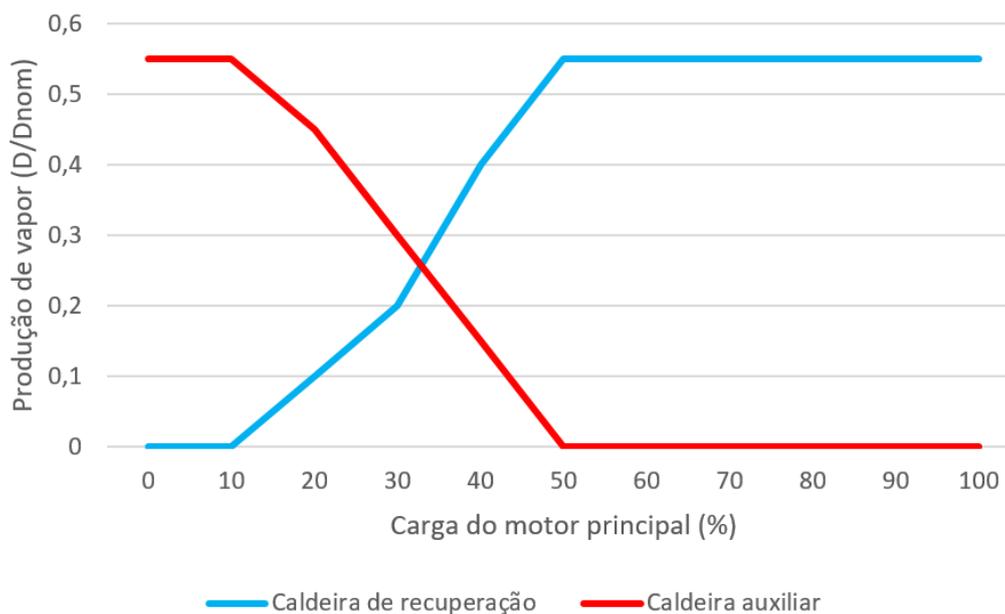


Figura 2.8: Perfil operacional das caldeiras
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [27]

¹¹Conforme mencionado na subseção 2.3.1, um dos requisitos de qualidade do bunker é a capacidade de escoar com facilidade. Tal menção deve-se justamente ao fato de o combustível geralmente ser muito viscoso, o que pode acarretar problemas de manuseio. Nesse sentido, o aquecimento por meio de trocadores de calor a vapor é fundamental, especialmente antes da injeção do combustível no motor [23].

2.4 Transporte marítimo e gases estufa

2.4.1 Eficiência de carbono do transporte hidroviário

Do ponto de vista de emissões de gases de efeito estufa, o transporte hidroviário¹², num primeiro momento, destaca-se positivamente: trata-se de um modal eficiente, especialmente quando comparado aos modais aeroviário e rodoviário: conforme ilustrado pela figura 2.9, o transporte de carga aquaviário gera entre 5 e 90 gramas de CO₂ a cada tonelada-quilômetro transportada, ou seja, possui uma eficiência de carbono bastante superior ao modais rodoviário (~ 75 a 1.200 gCO₂/t-km) e aeroviário (~ 400 a 2.900 gCO₂/t-km) [10].

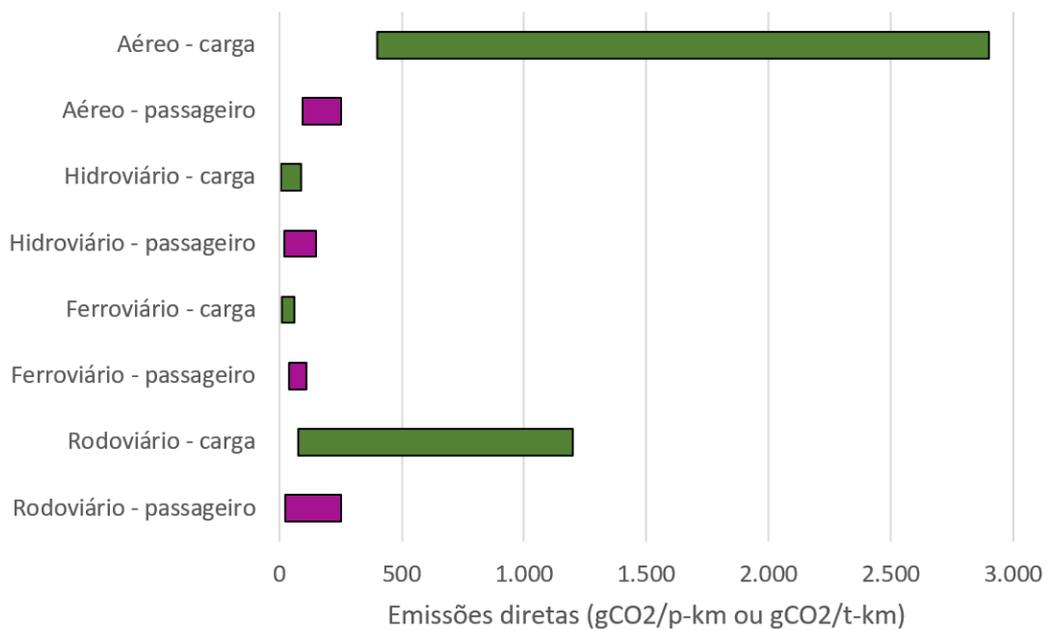


Figura 2.9: Emissões de CO₂ por tonelada-quilômetro de acordo com modal

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [10]

A eficiência do transporte marítimo de carga fica ainda mais visível ao se detalhar a faixa de emissões de acordo com o tipo de embarcação (figura 2.10). A faixa superior de emissões por tonelada-quilômetro é ocupada por barcaças e balsas [10], que têm importância econômica relativamente pequena. Navios graneleiros, porta-contêineres e navios-tanque, principais motores da economia marítima global [14], operam com fatores de emissão restritos a uma faixa ainda menor, entre 5 e 25 gCO₂/t-km [10].

¹²Note-se que o transporte hidroviário inclui a movimentação por rios e lagos.

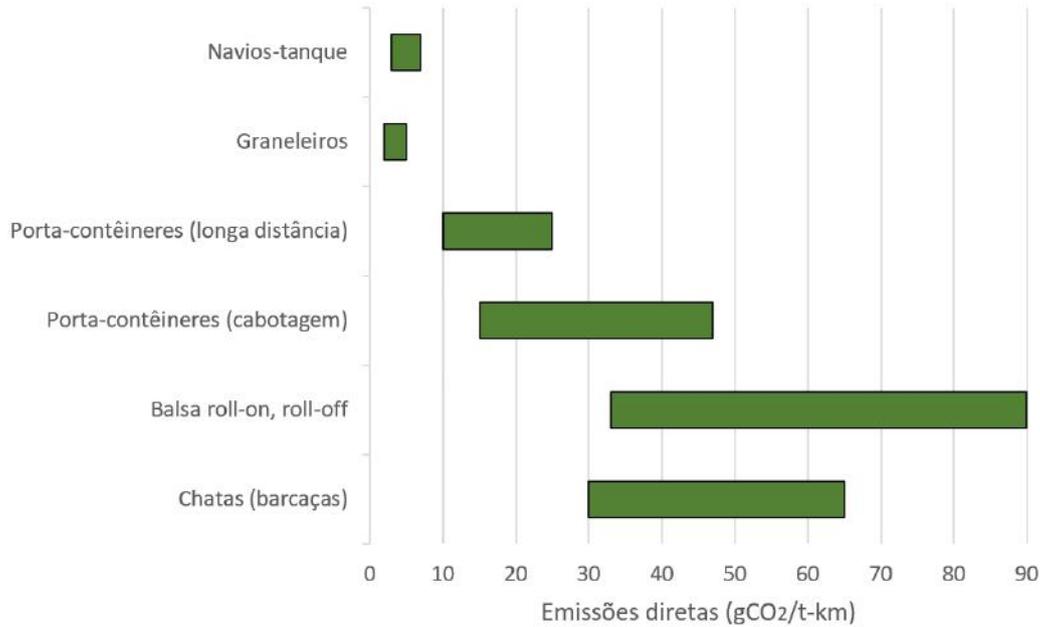


Figura 2.10: Emissões de CO₂ por tonelada-quilômetro por tipo de embarcação
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [10]

2.4.2 Emissões do transporte marítimo internacional

Ainda que o modal hidroviário se destaque por uma alta eficiência de carbono, o transporte marítimo responde por uma parcela considerável das emissões de GEE do setor de transportes (13,2% em 2010 [10][26]). A figura 2.11 mostra a evolução do valor absoluto dessas emissões entre 2007 e 2012, de acordo com o mais recente levantamento da Organização Marítima Internacional (IMO) sobre o assunto, realizado em 2014 [26].

Considerando-se o setor marítimo como um todo, as emissões anuais estiveram, ao longo dos anos em questão, em torno de 1.036 MtCO₂eq, das quais aproximadamente 80% vinculadas ao transporte marítimo internacional [26]. Assim, a navegação em águas internacionais responde por cerca de 866 MtCO₂eq ou 2,5% das emissões anuais totais de GEE do planeta [26].

Para se ter uma ideia da magnitude desse montante, é interessante compará-lo às emissões anuais de GEE por país: se o CO₂eq emitido pelo TMI fosse atribuído a uma nação independente fictícia, tal nação ocuparia o sexto lugar no ranking de maiores poluidores globais, à frente de países como Alemanha, Brasil e Inglaterra (figura 2.12) [28].

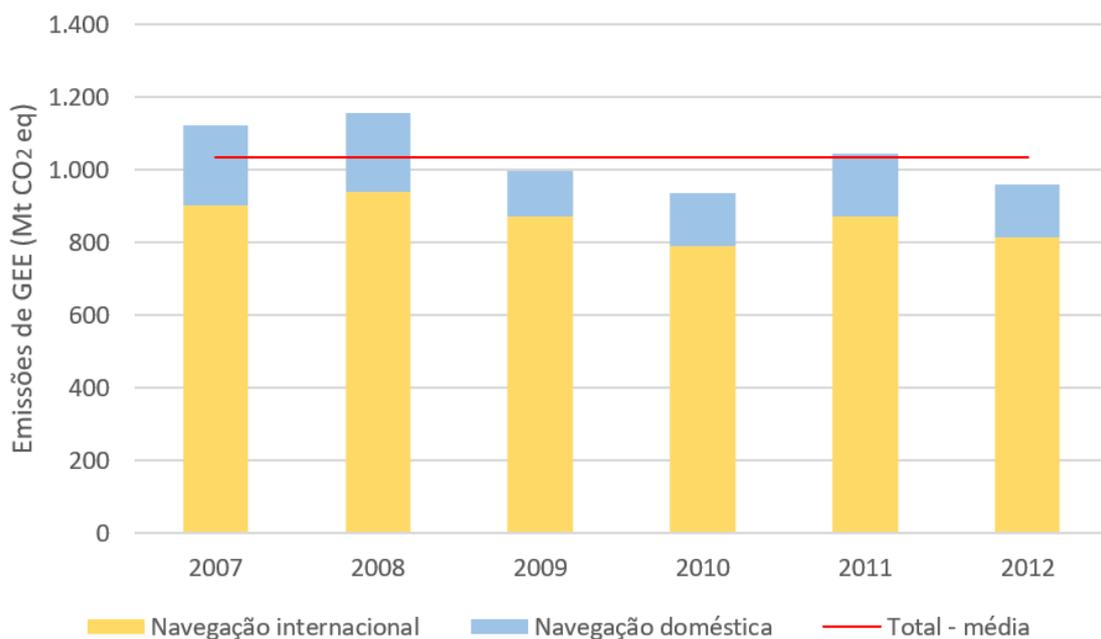


Figura 2.11: Emissões de GEE no setor marítimo mundial entre 2007 e 2012
Fonte: Elaboração própria com base em dados de [26]

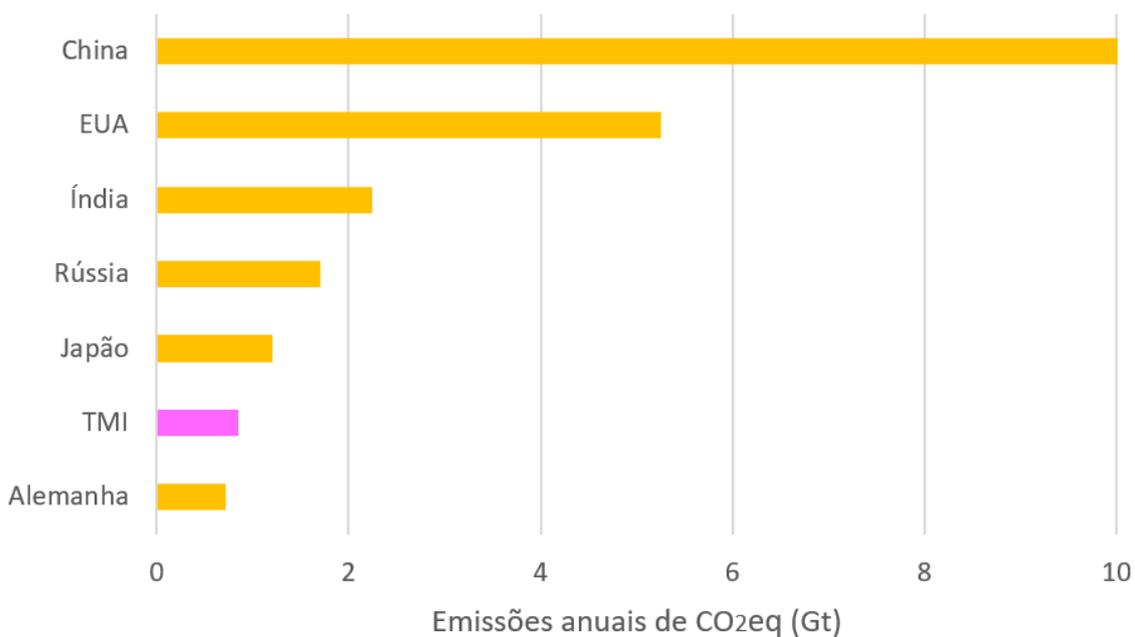


Figura 2.12: Ranking dos maiores emissores de GEE e emissões do TMI
Fonte: Elaboração própria com base em dados de [26] e [28]

Segundo o último panorama publicado pelo Fórum Internacional dos Transportes (ITF) [29], em médio e curto prazo, o comércio internacional tende a se intensificar consideravelmente. Assim, caso não haja medidas concretas visando à mitigação, haverá crescimento das emissões de carbono do transporte marítimo. De acordo com um dos cenários *Business As Usual* criados pela IMO, tal crescimento pode chegar a 250% em relação aos níveis de 2012 [26]. Estima-se que, caso o setor permaneça sem regulação, as emissões do TMI possam chegar a 17% do CO₂eq total emitido em 2050 [30].

Diante do potencial de crescimento das emissões de GEE do setor, existe uma preocupação adicional: o transporte marítimo internacional, assim como o transporte aéreo internacional, não foi incluído no Acordo de Paris de 2015 [6].

Por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) dos países signatários do referido acordo, nova referência da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), pretende-se alavancar políticas de desenvolvimento sustentável globalmente, de modo a limitar o aumento da temperatura média do planeta a 2° C [11]. Ocorre que as NDCs, por definição, abarcam apenas ações de mitigação domésticas e assim, o transporte marítimo internacional não foi contemplado pelo Acordo de Paris [6]. Optou-se, alternativamente, por atribuir tal responsabilidade à própria IMO [26], que é uma agência especializada das Nações Unidas (ONU) [31].

2.4.3 Navios petroleiros

Naturalmente, as embarcações envolvidas no transporte marítimo internacional são as mais diversas. Contudo, três classes destacam-se por sua proeminente importância econômica: os navios graneleiros (*bulk carriers*), os porta-contêineres (*container ships*) e os navios-tanque (*tankers*) [26]. Juntas, as três categorias respondem por 75% das emissões de CO₂ do TMI (figura 2.13).

Os primeiros navios graneleiros foram construídos nos anos 1950, com o objetivo de carregar grandes quantidades de mercadorias a granel. Com a intensificação do processo de globalização nas últimas décadas, a demanda por transporte marítimo de matérias-primas como soja, minério de ferro, cobre e carvão aumentou exponencialmente e, assim, os graneleiros ganharam grande importância no comércio internacional. Hoje, essa classe de navios responde por 43% da frota mercante mundial em termos de arqueação [32].

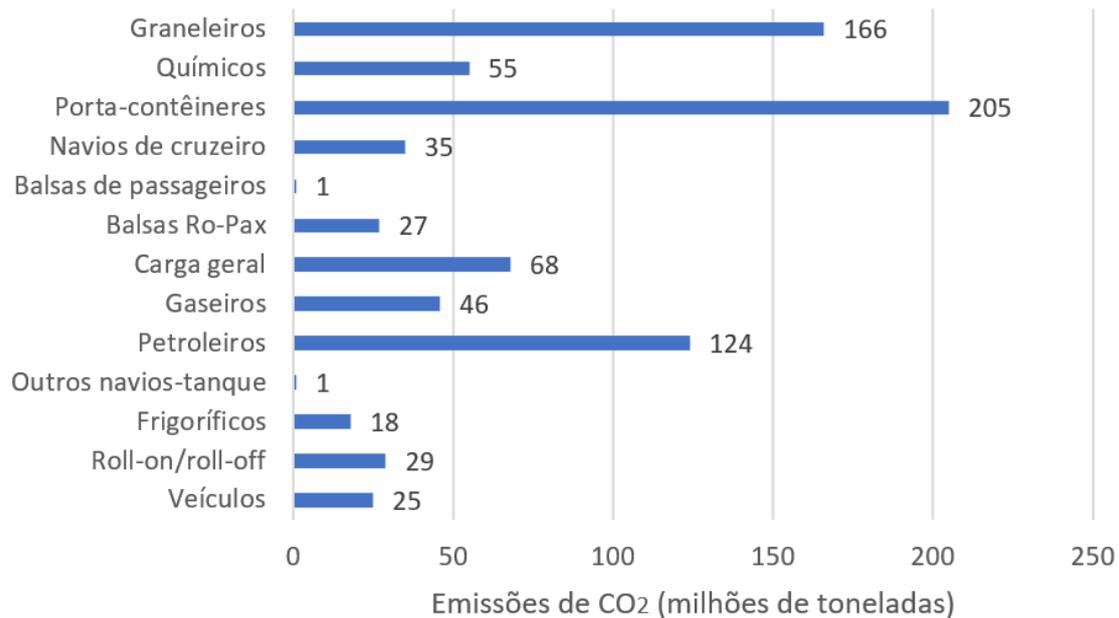


Figura 2.13: Emissões de CO₂ do TMI por classe de navio em 2012

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [26]

Igualmente importantes são os navios porta-contêineres: além de poderem carregar uma enorme diversidade de mercadorias, essas embarcações destacam-se por seu caráter intermodal, já que o transporte em contentores¹³ garante uma melhor integração dos navios com os modais rodoviário e ferroviário. Essa característica revolucionou o transporte de carga global e explica o grande crescimento dessa categoria ao longo dos últimos 30 anos, em detrimento dos navios de carga geral (*general cargo ships*). Hoje, a maior parte das mercadorias *non-bulk*¹⁴ é transportada em porta-contêineres [33].

A terceira grande classe do transporte marítimo internacional é composta pelos navios-tanque, foco desta dissertação. Tendo surgido no final do século XIX com a finalidade de escoar a produção de petróleo do Azerbaijão para o mercado europeu [34], os navios-tanque modernos subdividem-se em quatro categorias [35]:

- petroleiros de óleo cru (*crude oil tankers*), usados para transportar petróleo bruto;
- navios-tanque de produtos (*product tankers*), utilizados no transporte de derivados de petróleo, como gasolina, óleo diesel e querosene de aviação;
- navios químicos (*chemical tankers*), usados para transportar substâncias como metanol, soda cáustica, óleo de palma, enxofre líquido e ácido fosfórico;

¹³Sinônimo de contêiner.

¹⁴Mercadorias cujo transporte não é realizado a granel.

- navios metaneiros ou gaseiros (*gas carriers*), usados para transportar GNL.

Note-se que, na figura 2.13, as duas primeiras categorias (*crude oil tankers* e *product tankers*) são apresentadas sob o mesmo rótulo, “petroleiros”. Cabe ressaltar, entretanto, que a cenarização cujo desenvolvimento será exposto no capítulo 4 refere-se apenas aos petroleiros de óleo cru, ou seja, aos *crude oil tankers*. De acordo com a figura 2.14, navios-tanque desse tipo respondem por aproximadamente 60% das emissões de CO₂ de petroleiros e por 35% das emissões de navios-tanque.

Sob a perspectiva das figuras 2.13 e 2.14, as quais apresentam massas de CO₂ emitidas anualmente, não se têm informações a respeito da repartição das emissões por origem. Isto pode levar à falsa impressão de que, independentemente do tipo de navio, os perfis de emissões de motores principais, motores auxiliares e caldeiras são iguais. Na figura 2.15, mostra-se o consumo de combustível em cada um desses sistemas para os principais tipos de navios mercantes em 2012.

A partir da figura, percebe-se que, em petroleiros, a proporção de emissões advindas de motores principais situa-se ligeiramente abaixo da média dos navios mercantes em geral: em graneleiros e navios de carga geral, esse número está em torno de 80%, enquanto, em petroleiros, a proporção é de aproximadamente 70%. Tal discrepância explica-se pelo alto consumo de HFO em caldeiras: enquanto a demanda por calor está na origem de menos de 5% das emissões da maior parte dos navios (sendo inclusive nula no caso de graneleiros), ultrapassa os 10% no caso dos petroleiros¹⁵.

¹⁵A elevada demanda por calor de caldeiras auxiliares em *oil tankers* relaciona-se ao procedimento de descarga do petróleo/produto, durante o qual se empregam bombas a vapor (*cargo oil pumps*) [36].

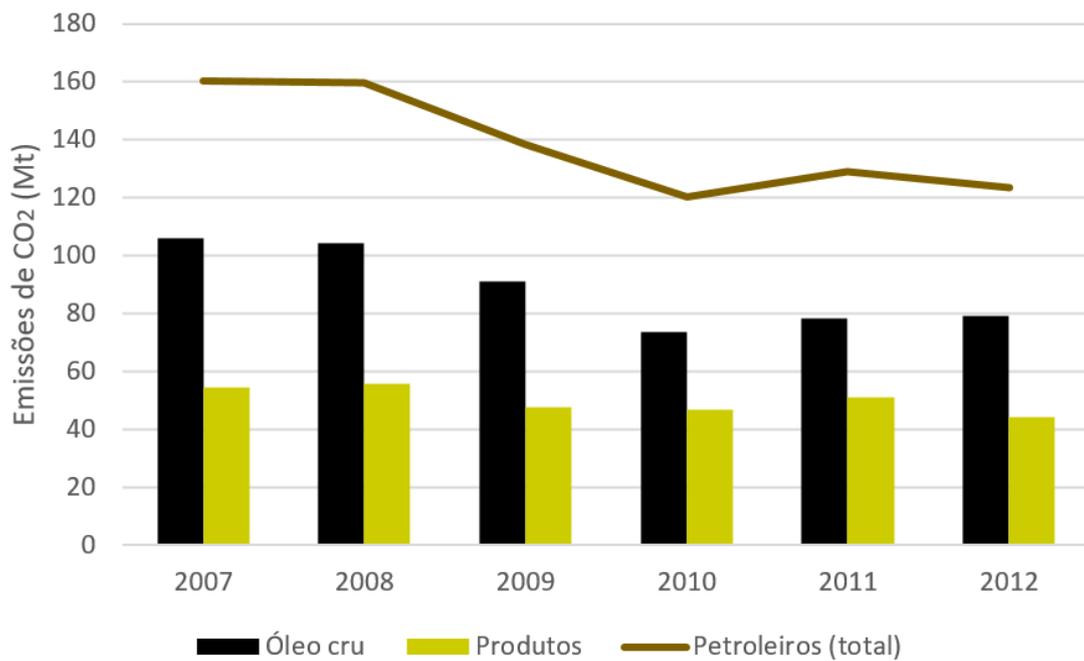


Figura 2.14: Emissões de CO₂ de petróleo entre 2007 e 2012

Fonte: Elaboração própria com base em dados de [26]

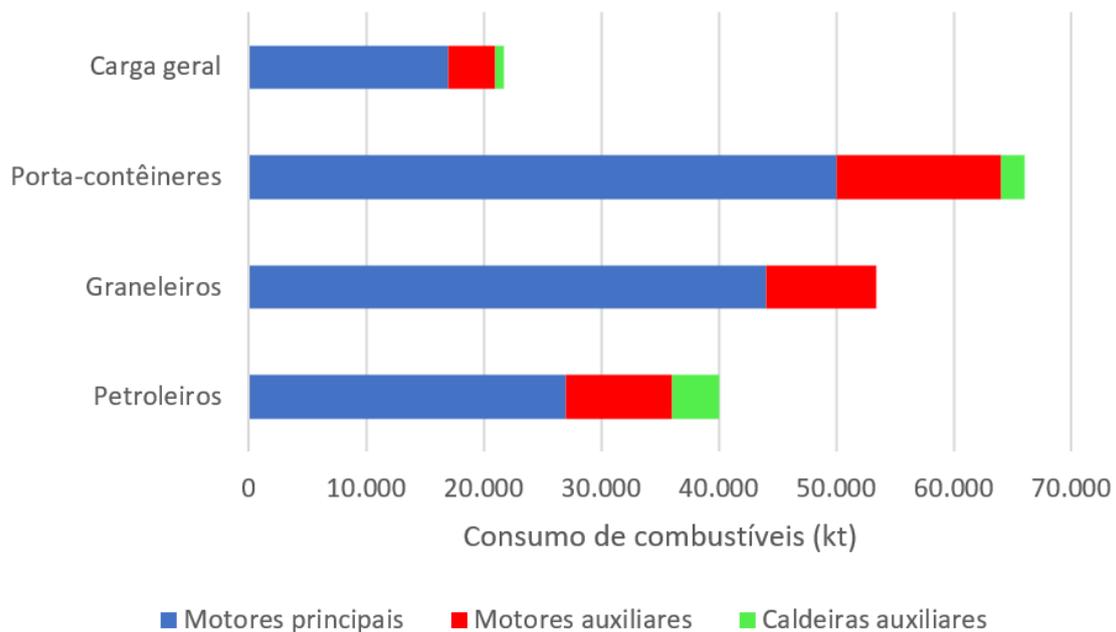


Figura 2.15: Consumo de combustível nas principais classes de navios (2012)

Fonte: Elaboração própria com base em dados de [26]

Capítulo 3

Mitigação das Emissões do Transporte Marítimo Internacional

3.1 Histórico e estágio atual

A preocupação com as emissões de GEE do transporte marítimo internacional não é recente: desde a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92), tem-se consciência do efeito da queima de combustíveis fósseis (e, portanto, da contribuição dos navios mercantes) para a intensificação do aquecimento global [37].

Ocorre que a responsabilidade sobre as emissões de CO₂ do setor sempre coube à IMO. A decisão de não se incluir o TMI no Acordo de Paris em 2015, por exemplo, não foi propriamente uma novidade: desde a COP-3 (1997), em que se assinou o Protocolo de Quioto, optou-se por legar a tarefa de redução das emissões do transporte marítimo à agência da ONU [38].

A indústria do transporte marítimo é conservadora e extremamente resistente a todo tipo de regulação. Demonstra forte interesse pelas discussões que ocorrem na IMO, tendo inclusive uma grande influência na instituição por meio da presença de associações comerciais de caráter consultivo, como a *International Chamber of Shipping* (ICS). Além disso, por conta do sistema de “bandeiras de conveniência”¹, países como Panamá, Libéria, Bahamas e Ilhas Marshall têm grande poder na IMO. Tais nações dificilmente são representadas por integrantes de ministérios ligados ao clima e ao ambiente [38].

As negociações sobre ações de mitigação encontram um obstáculo adicional nas discussões a respeito da correta alocação das emissões: nesse sentido, estão em

¹Um navio com bandeira de conveniência é uma embarcação que ostenta uma nacionalidade diferente da de seu Estado de Registro. Geralmente, por trás dessas mudanças estão interesses econômicos que têm efeitos perversos, como a diminuição dos salários da tripulação e a piora de suas condições de trabalho, graças à fragilidade das leis trabalhistas dos países que se dispõem a se aproveitar dessa demanda [39].

constante conflito o princípio da IMO de “igual tratamento de todos os navios” e o princípio de responsabilidades comuns mas diferenciadas (*Common But Differentiated Responsibilities*, CBDR) da UNFCCC [38].

Ante o exposto, o combate às mudanças climáticas na esfera do transporte marítimo internacional não experimentou avanços significativos nos últimos 20 anos. Durante muito tempo, discutiu-se a possibilidade de se implementar uma MBM no setor, o que sem dúvida teria um impacto relevante nas emissões de CO₂. Contudo, em 2013, as discussões a respeito do tema foram oficialmente suspensas [7]. Mais recentemente, a esperança por uma possível implementação de MBMs ressurgiu pois, no MEPC-70 (outubro/2016), definiu-se que, em 2018, será proposta uma estratégia inicial de combate às emissões de GEE nesse campo [40][41].

3.1.1 A política de eficiência energética da IMO

Entre as poucas ações de mitigação das emissões de GEE promovidas pela IMO, destaca-se sua política de eficiência, que se baseia no Índice de Projeto de Eficiência Energética (*Energy Efficiency Design Index*, EEDI) [42]. Apesar do nome, trata-se, na realidade, de um índice de eficiência de carbono, já que é definido pela fração [43]

$$\text{EEDI} = \frac{\text{Massa de CO}_2 \text{ emitida}}{\text{Trabalho de transporte realizado}}. \quad (3.1)$$

O EEDI é calculado para uma condição específica de carga. O cálculo baseia-se numa equação bastante complexa, envolvendo motores principais e auxiliares, a qual podemos resumir por

$$\text{EEDI}_{\text{calculado}} = \frac{P_B \times \text{SFC} \times \text{FE}}{\text{DWT} \times v}, \quad (3.2)$$

sendo P_B a potência de saída do motor, SFC seu consumo específico, FE o fator de emissão do combustível, DWT a quantidade de carga transportada e v a velocidade da embarcação (todos esses conceitos serão melhor explorados ao longo do capítulo 4).

De acordo com a política da IMO, em todos os novos navios, o EEDI calculado deve ser menor do que o EEDI requerido, que varia com o tempo e de acordo com a classe de embarcação. Ou seja,

$$\text{EEDI}_{\text{calculado}}^i < \text{EEDI}_{\text{requerido}}^i = (1 - \text{FR}_i) \times \text{EEDI}_{\text{base}}, \quad (3.3)$$

sendo $\text{EEDI}_{\text{calculado}}^i$ o EEDI atingido no ano i e $\text{EEDI}_{\text{requerido}}^i$, o EEDI requerido neste mesmo ano, que é calculado a partir do valor da linha de base ($\text{EEDI}_{\text{base}}$), considerando-se o fator de redução do ano i , FR_i .

Na figura, mostra-se a linha de base utilizada pela IMO para o cálculo do EEDI requerido no caso de navios-tanque e, na figura 3.2, os fatores de redução aplicáveis a diversas categorias, sendo

- Fase 0: Janeiro 2013 - Dezembro 2014;
- Fase 1: Janeiro 2015 - Dezembro 2019;
- Fase 2: Janeiro 2020 - Dezembro 2024;
- Fase 3: Janeiro 2025 em diante.

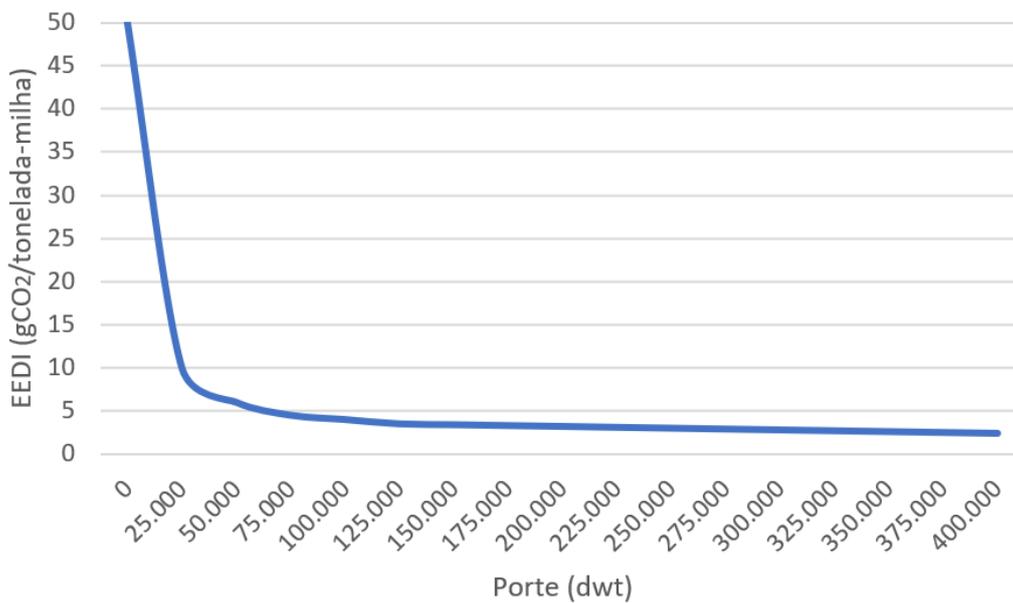


Figura 3.1: Linha de base para cálculo do EEDI em navios-tanque
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [43]

Considere-se, a título de exemplo, um petroleiro com $DWT = 300.000$ dwt, entrando em operação em 2025. Para que se adeque à regulamentação, seu EEDI deverá ser

$$EEDI_{calculado}^{2025} < (1,00 - 0,30)(2,5 \text{ gCO}_2/\text{t-milha}) \quad (3.4)$$

$$EEDI_{calculado}^{2025} < 1,75 \text{ gCO}_2/\text{t-milha} \quad (3.5)$$

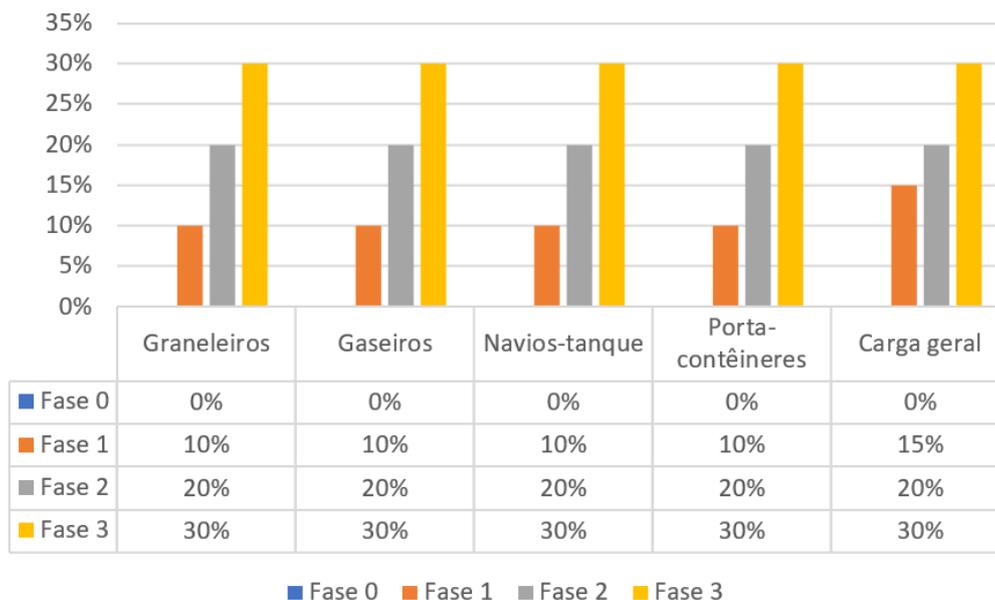


Figura 3.2: Fatores de redução aplicáveis a diferentes categorias
Fonte: Elaboração própria com base em dados de [43]

Apesar de servir como estímulo à eficiência energética, a conformidade com o índice pode ser atingida por meio do uso de combustíveis de menor teor de carbono. De fato, conforme detalharemos na seção 3.3, uma razão secundária para a adoção do GNL como combustível poderia ser a observância dos requisitos do EEDI.

Cabe ressaltar, no entanto, a limitação dessa medida mitigadora: além de as metas da política não serem suficientemente ambiciosas, o índice aplica-se apenas a novas embarcações. Tendo em vista a longa vida útil de navios mercantes (25 a 30 anos [32][35]), o impacto do regime de *compliance* é bastante discreto.

3.2 *Slow steaming*

3.2.1 Definição e histórico

No setor marítimo, parte do potencial de mitigação das emissões de GEE reside na possibilidade de se praticar *slow steaming*. Por *slow steaming* entende-se a redução deliberada da velocidade de serviço de um navio, com vistas a reduzir o consumo de combustível associado à sua movimentação [44].

Conforme detalhado no anexo A, a principal componente da potência de resistência ao avanço de uma embarcação é proporcional ao cubo de sua velocidade e assim, pequenas reduções de velocidade acarretam significativa economia de combustível [17].

Na figura 3.3, mostra-se, a título de exemplo, o resultado de um estudo [45] que buscou mensurar acuradamente o impacto de dois diferentes níveis de *slow steaming* sobre o consumo de combustível do motor principal de um graneleiro de grande porte². A economia de combustível é substancial: 50% para uma redução de 15 para 12 nós e 70% para uma redução de 15 para 10 nós.

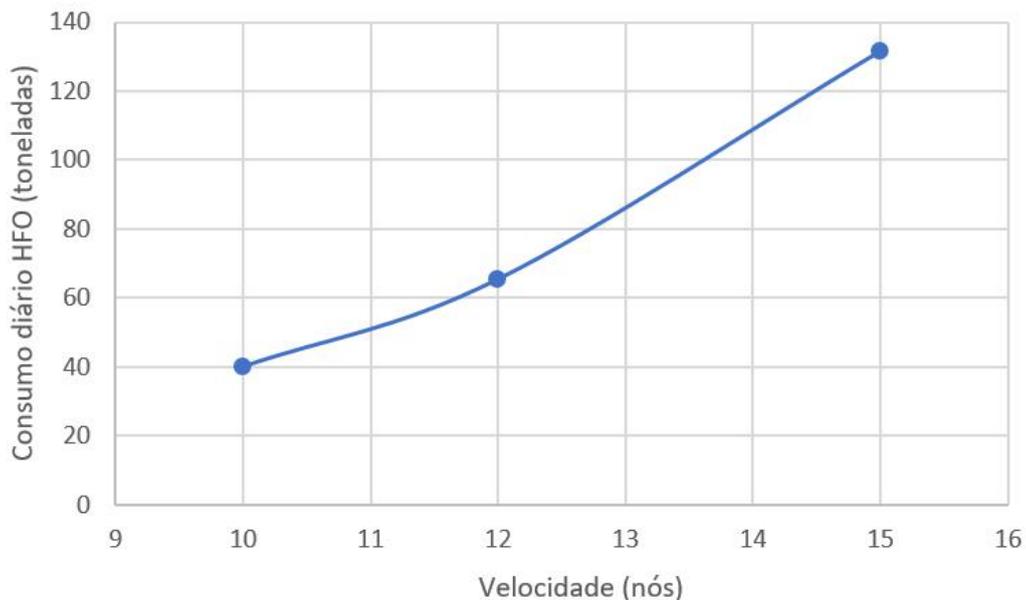


Figura 3.3: Consumo de combustível como função da velocidade - navio minereiro
Fonte: Elaboração própria com base em dados de [45]

²O navio em questão é um Valemax, graneleiro de transporte de minério de ferro, ou seja, um navio da categoria VLOC (*Very Large Ore Carrier*).

Note-se que a motivação por trás de tal artifício não é necessariamente ambiental. A prática teve início a partir de 2008³, quando o mercado do transporte marítimo internacional deparou-se com uma frota superdimensionada, taxas de frete declinantes (figura 3.4) e preços de bunker em alta. Nessa ocasião, a adoção do *slow steaming* serviu muito mais como um mecanismo de absorção da capacidade ociosa e de redução dos custos com combustível do que como meio de diminuir as emissões de CO₂ [44].

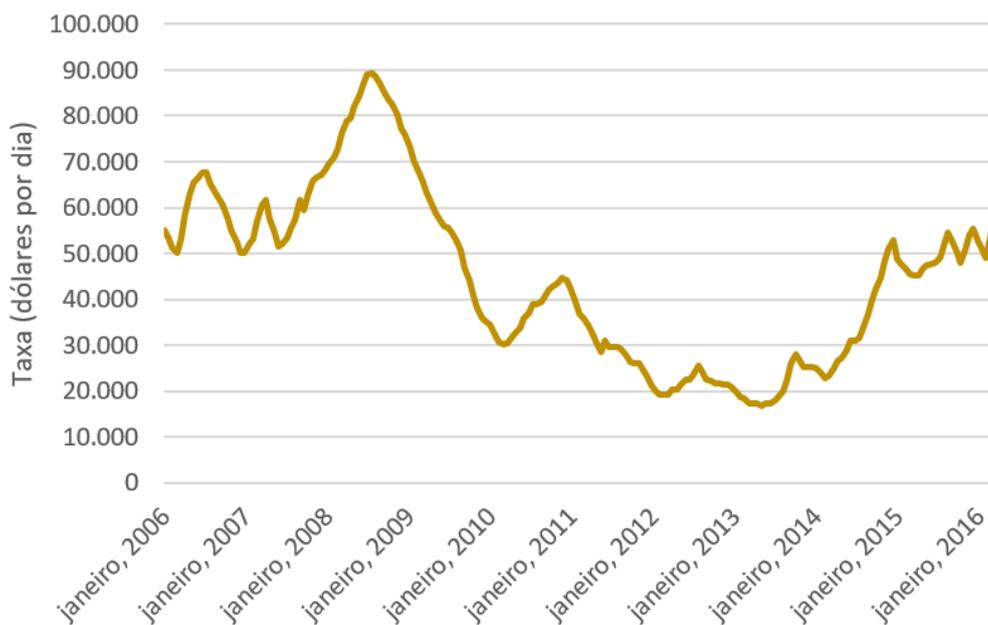


Figura 3.4: Taxa de frete para VLCCs (contrato de um ano)

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [47]

Mesmo que a prática não tenha surgido a partir de uma real preocupação com a poluição global, trata-se de uma possibilidade efetiva para mitigação das emissões de GEE: conforme mostra o exemplo da figura 3.3, a redução da quantidade de combustível demandada (e, conseqüentemente, do CO₂ emitido) pode ser substancial. Tal ganho já foi observado na prática: conforme ilustra a figura 3.5, entre 2008 e 2010, houve significativa queda no total de emissões de CO₂ do setor marítimo [48], queda essa em grande parte atribuída à navegação em velocidades mais baixas [49].

³Durante o primeiro choque do petróleo em 1973, o preço do bunker disparou, o que fez com que os armadores diminuíssem a velocidade de navios mercantes a fim de evitar grandes custos com combustível [46]. No entanto, a conceituação de *slow steaming* como política ambiental e estratégia para absorção de capacidade ociosa surgiu décadas depois, na esteira da crise financeira de 2008 [44].

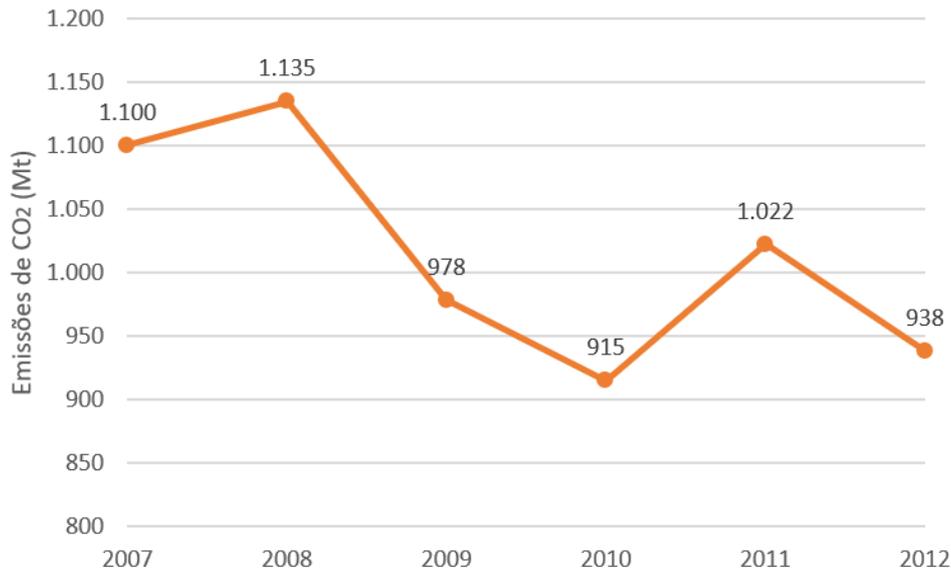


Figura 3.5: Emissões de CO₂ do setor marítimo entre 2007 e 2012

Fonte: Elaboração própria com base em dados de [26]

Em termos de nomenclatura, costuma-se distinguir três diferentes níveis de redução de velocidade (tabela 3.1): por *slow steaming*, entende-se uma diminuição de 15 a 20% da velocidade em relação à condição normal de operação. Já a expressão *extra slow steaming* denota um regime de operação com velocidade entre 25 e 30% inferior à convencional. No caso de reduções ainda mais severas, emprega-se o termo *super slow steaming* [46].

Tabela 3.1: Redução de velocidade em diferentes níveis de *slow steaming*

Fonte: [46]

<i>Slow steaming</i>	15-20%
<i>Extra slow steaming</i>	25-30%
<i>Super slow steaming</i>	Mais de 30%

3.2.2 Benefícios e inconvenientes

Os benefícios associados ao *slow steaming* são bastante evidentes: além de a prática promover economia de combustível, diminuição das emissões de CO₂ e de outros gases estufa, contribui também para redução das emissões de poluentes locais tais como óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre e (SO_x) [50].

Ademais, trata-se de uma medida mitigadora que ocorre em nível operacional, não requerendo, a princípio⁴, investimento em tecnologias alternativas. No entanto, a operação de navios em velocidades mais baixas pode acarretar alguns problemas técnicos, relacionados principalmente à subutilização do motor principal [50]. Entre as principais preocupações dos engenheiros navais a respeito do tema, destacam-se as possibilidades de [51]

- empobrecimento da combustão devido a má atomização do combustível, gotejamento ou entupimento;
- redução do fluxo de ar e aumento na temperatura do exausto;
- condensação de vapores corrosivos durante a operação em cargas muito baixas;
- entupimento dos sistemas de exaustão e de turbocompressão.

Tais problemas podem ser minorados, contudo, por meio de uma série de soluções tecnológicas, como, por exemplo, kits de atualização do funcionamento do motor principal (*retrofit/upgrade*). No caso de embarcações cujo perfil de velocidade será alterado em longo prazo, a redução definitiva da potência do motor também é uma opção [51].

Além do impacto operacional de caráter técnico, o *slow steaming* provoca uma alteração significativa na dinâmica da cadeia logística na qual os navios mercantes estão inseridos [51]. A seguir, detalham-se os principais impactos para cada agente da cadeia⁵.

Proprietário da carga

Do ponto de vista do proprietário da carga, o principal inconveniente do *slow steaming* diz respeito à duração das viagens: sob um regime de velocidades mais baixas, os bens transportados podem demorar dias ou mesmo semanas a mais para chegarem ao destino, possivelmente acarretando aumento de custos e mudanças no planejamento logístico [51]. A título de exemplo, mostram-se, na figura 3.6, os tempos necessários para o percurso do trajeto Brasil-China por um navio petroleiro⁶. Duas semanas são acrescidas à viagem no caso de um *extra slow steaming*.

⁴Os problemas decorrentes da operação em cargas muito baixas podem tornar necessário um *retrofit* ou *upgrade* do motor principal, conforme será detalhado mais à frente.

⁵Note-se que se assumiu que o armador não é o proprietário do navio, ou seja, que há um contrato de fretamento entre uma empresa que possui o navio e uma transportadora. Trata-se do caso mais geral possível, sendo também uma possibilidade o caso em que esses agentes se confundem.

⁶Considerou-se um navio Suezmax com velocidade de projeto igual a 15 nós, navegando de São Sebastião (Brasil) a Qingdao (China).

No caso de navios como porta-contêineres, a diferença é menos significativa⁷, uma vez que as velocidades de projeto são mais elevadas (da ordem de 25 nós) [17].

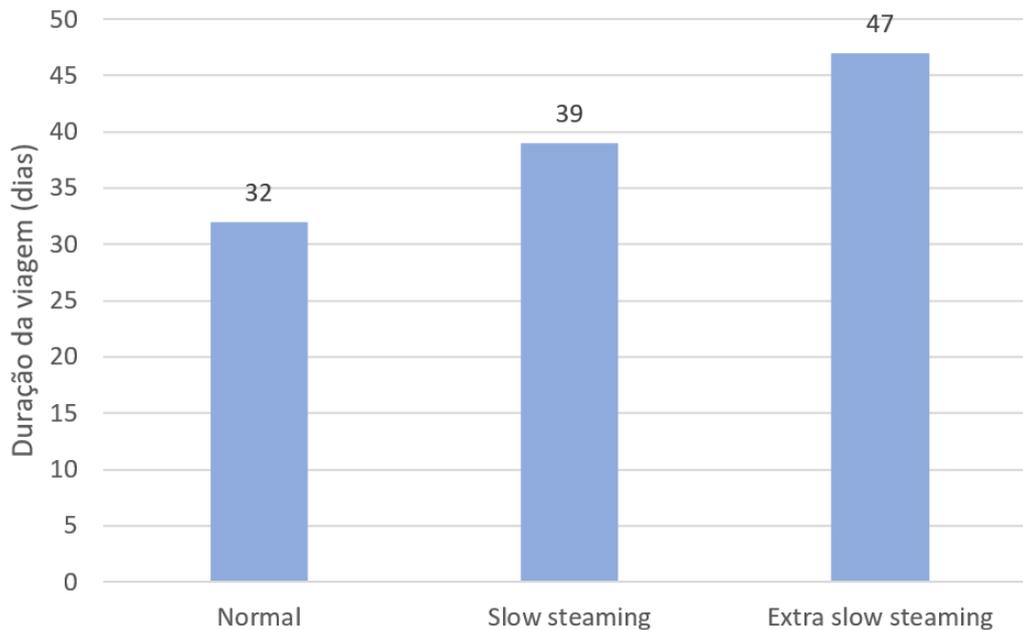


Figura 3.6: Duração da viagem Brasil-China para um petroleiro Suezmax
Fonte: Elaboração própria com base em dados de [52]

Afretador

Sob a perspectiva do afretador, a principal questão é o tamanho da frota: com viagens mais demoradas, o número de navios necessários para se cumprir determinado cronograma de entregas aumenta. Isso pode ser vantajoso, no entanto, para absorção de capacidade ociosa [51].

Por serem aqueles que mais têm a se beneficiar da economia de combustível, os afretadores são os agentes com maior potencial de impulsionar o *slow steaming*. Conforme discutido, a economia de combustível ao se optar por regimes moderados de velocidade é bastante expressiva, o que torna a prática atrativa sob o prisma econômico. Evidentemente, os custos de capital adicionais decorrentes da necessidade de uma frota maior devem ser levados em conta, bem como as restrições em relação à adoção dessa prática (para alguns serviços, pode ser inviável). Contudo, o saldo parece ser positivo para os afretadores: mesmo com o crescimento da frota, estima-se que a economia associada ao *slow steaming* possa chegar a 25% [51].

⁷Embora seja igual em termos percentuais.

Fretador (proprietário do navio)

Em contratos de fretamento, geralmente fica a cargo do proprietário da embarcação prover as condições de utilização requeridas, inclusive aquelas relacionadas à velocidade. Assim, caso o afretador opte pelo *slow steaming*, o navio deverá adequar-se a essa condição. Nesse sentido, teme-se que o fretador tenha que arcar inteiramente com os custos decorrentes das adaptações necessárias, não se beneficiando da prática como os afretadores [51].

3.3 Gás natural liquefeito (GNL)

Assim como migrou, por razões de eficiência, da tecnologia a vapor para os motores a combustão interna, o setor marítimo vê-se diante da possibilidade de, motivado por restrições ambientais, dar espaço à propulsão por gás natural liquefeito em detrimento do bunker.

O GNL é produzido a partir do resfriamento do gás natural até $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura na qual o combustível é líquido, com densidade 600 vezes maior do que no estado gasoso. Tal processo de transformação permite que o gás natural amplie seu alcance pois, uma vez liquefeito, não depende mais do modal dutoviário, podendo ser transportado por caminhões e navios [53].

O crescente interesse pelo gás no âmbito do transporte marítimo deve-se sobretudo ao contínuo aumento do rigor da regulamentação internacional no que se refere à poluição local: o bunker, composto por frações pesadas do petróleo, é rico em enxofre e, ao ser queimado, emite óxidos dessa substância, que são nocivos à saúde humana e ao meio ambiente [54].

Atualmente o teor de enxofre no bunker tolerado pela IMO é de $3,5\%⁸$ (base mássica), mas, a partir de 2020, o limite passará a ser $0,5\%$ [54]. Com vistas a cumprir tal regulamentação, a alternativa mais conservadora seria a utilização de *bunker* de baixo teor de enxofre (tabela 3.2).

Tabela 3.2: Tipos de bunker por teor de enxofre

Fonte: [55]

<i>Tipo</i>	<i>Denominação</i>	<i>Teor de S (%)</i>
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i>	$>1,5$
LSHFO	<i>Low Sulphur Heavy Fuel Oil</i>	$<1,5$
LFO	<i>Light Fuel Oil</i>	$0,2 - 2,0$
LSLFO	<i>Low Sulphur Light Fuel Oil</i>	$0,01 - 0,2$
ULSLFO	<i>Ultra Low Sulphur Light Fuel Oil</i>	$< 0,01$

No entanto, conforme mostra a figura 3.7, o preço do bunker ULSFO é, em média, 50% superior ao do combustível convencional. De fato, a energia necessária para a hidrodessulfurização (HDS) aumenta exponencialmente conforme se diminui o teor de enxofre do produto desejado e, assim, produzir esse tipo de combustível torna-se um processo bastante caro. Já o gás, praticamente livre de heteroátomos, apresenta preços mais interessantes.

⁸Exceto em zonas de emissões controladas (ECAs), em que esse limite é de $0,1\%$.

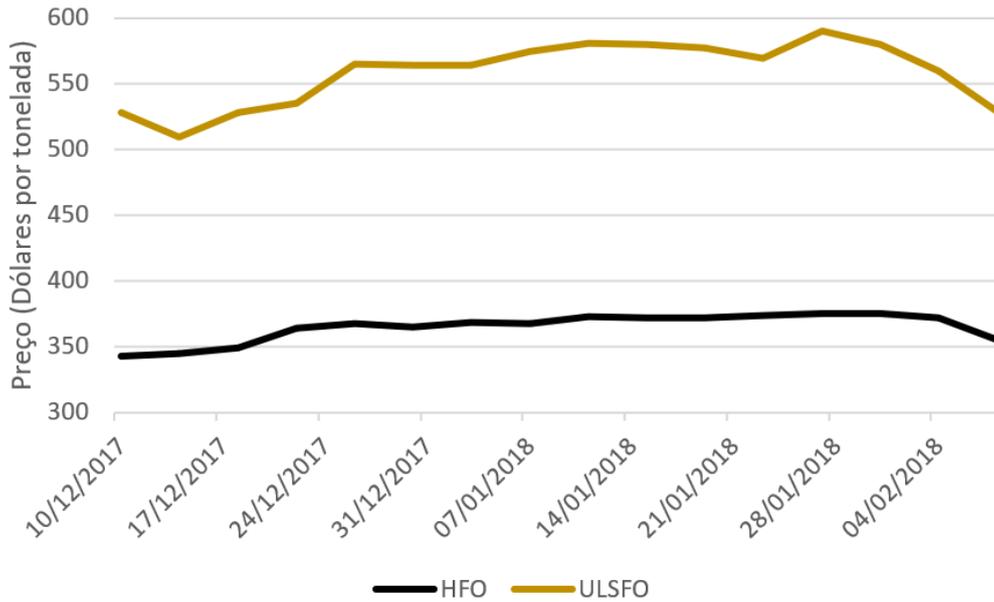


Figura 3.7: Preço do HFO e do ULSFO no porto de Roterdã
Fonte: Elaboração própria com base em dados de [56]

Assim, as regulamentações mais estritas de poluição local podem impulsionar a entrada do GNL no mercado de combustíveis marítimo. Algumas grandes companhias construíram, nos últimos anos, os primeiros navios com motores a gás ou *dual-fuel*, capazes de trabalhar tanto com o GNL como com o bunker [57][58].

A mitigação das emissões de CO₂ surge, portanto, como co-benefício da redução da poluição local: em base energia, o fator de emissão do GNL é aproximadamente 25% inferior ao do bunker [26]:

$$FE_{GNL} = (150 \text{ g/kWh}) \times (2,75 \text{ gCO}_2/\text{g combustível}) = 413 \text{ gCO}_2/\text{kWh} \quad (3.6)$$

$$FE_{bunker} = (190 \text{ g/kWh}) \times (3,11 \text{ gCO}_2/\text{g combustível}) = 592 \text{ gCO}_2/\text{kWh} \quad (3.7)$$

A principal desvantagem do GNL como combustível marítimo é a ocupação de espaço: tendo em vista sua menor densidade, o GNL tende a demandar um maior volume de tanques de combustível, o que retira espaço do navio para a carga.

3.4 Biocombustíveis

3.4.1 Contexto do setor de transportes

O problema das mudanças climáticas, produto das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, fez com que o interesse por energia renovável crescesse consideravelmente nas últimas décadas. No entanto, a maior parte das fontes de energia limpa, a exemplo do recursos eólico e solar, serve à produção de eletricidade ou calor. Aí reside um importante diferencial da bioenergia, que pode se prestar à produção de energia armazenável e transportável, notadamente sob a forma de combustíveis líquidos. Tal característica confere à biomassa um grande potencial de utilização no setor de transportes [59].

Biocombustíveis são produzidos a partir de matéria orgânica (produtos vegetais ou compostos de origem animal) e sua principal contribuição ambiental advém do fato de as emissões de GEE provenientes de sua combustão serem compensadas pela sintetização de dióxido de carbono ao longo do processo de crescimento da biomassa vegetal que lhes deu origem, o que lhes torna neutros⁹ do ponto de vista de emissões de CO₂ [62].

Embora a bioenergia não seja propriamente uma novidade (o Brasil, por exemplo, lançou seu primeiro programa de substituição em larga escala de derivados de petróleo por etanol na década de 1970 [63]), considera-se que a utilização dos biocombustíveis esteja atualmente muito abaixo do potencial técnico em todo o mundo. Espera-se, no entanto, que os esforços no sentido de reduzir o uso de combustíveis fósseis contribuam para um maior aproveitamento desse potencial (figura 3.8) [10][64].

A garantia de transição para um setor de transportes mundial de baixo carbono nas próximas décadas passa necessariamente pela disseminação dos biocombustíveis: ainda que se confirme um cenário de eletrificação do transporte rodoviário de passageiros, setores como a aviação, a navegação e o transporte de carga rodoviário provavelmente dependerão da bioenergia para se tornarem sustentáveis [59][65].

Boa parte do mercado existente de biocombustíveis para transportes foi criado por meio de políticas de incentivo europeias, que fixaram metas de energias renováveis. No entanto, quase todo o consumo mundial de biocombustíveis ocorre no setor rodoviário [59]. Enquanto no setor de aviação a bioenergia dá seus primeiros passos [66], no setor marítimo, nota-se uma grande inércia no sentido de explorar o potencial de aproveitamento dos biocombustíveis, devida sobretudo ao baixo custo do óleo combustível e à sua alta densidade energética [67].

⁹Em geral, as emissões de CO₂ biogênicas são contabilizadas como neutras. Entretanto, em alguns casos, tal neutralidade tem sido questionada, por meio de análises de ciclo de vida e de balanço de carbono [60][61].

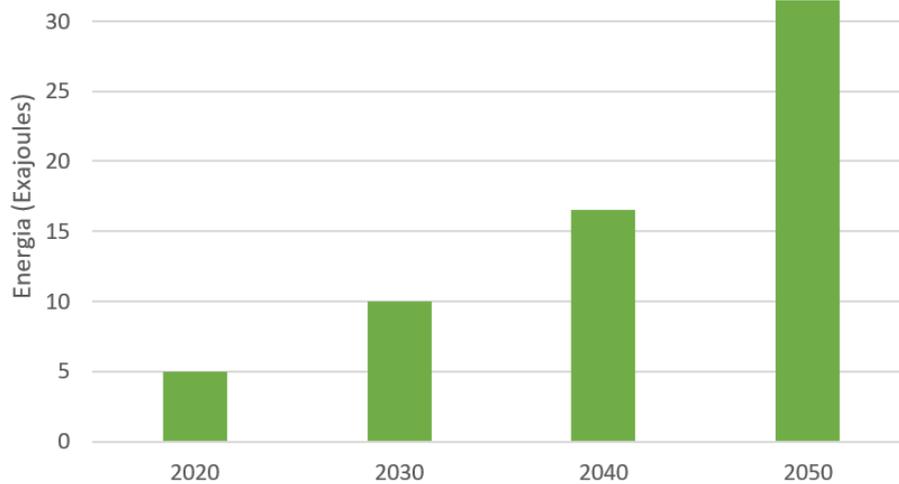


Figura 3.8: Projeção do consumo mundial anual de biocombustíveis
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [64]

Biocombustíveis podem ser produzidos por meio de inúmeras rotas e a partir de diversas matérias-primas, conforme ilustrado pelo fluxograma¹⁰ da figura 3.9. Os produtos são diversos (biodiesel, etanol, bio-óleos, etc.) e têm propriedades físicas e químicas muito específicas [59]. Algumas das rotas mostradas na figura 3.9 encontram-se bem estabelecidas, a exemplo da produção de etanol a partir de açúcar [63] e amido [68], enquanto outras encontram-se em fase de desenvolvimento tecnológico ou viabilização econômica¹¹ [59].

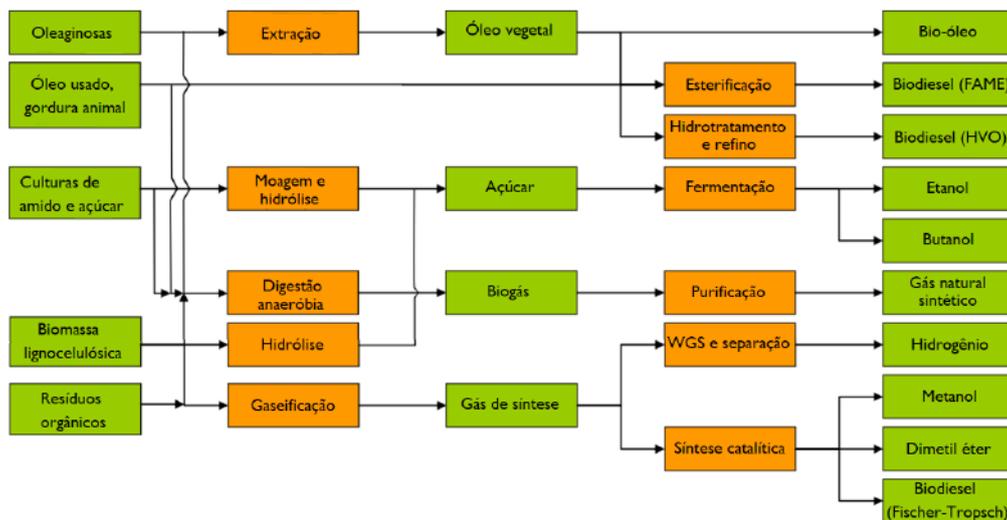


Figura 3.9: Panorama não exaustivo das rotas de produção de biocombustíveis
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [59]

¹⁰Não exaustivo.

¹¹Exemplos são processos termoquímicos via gaseificação ou hidrotratamento, além de processos biológicos avançados envolvendo hidrólise e fermentação.

3.4.2 Biocombustíveis no setor marítimo

Em 2012, por meio de seis estudos de caso, a consultoria britânica Ecofys avaliou o potencial de utilização de biocombustíveis no setor marítimo europeu [59].

Num primeiro momento, de acordo com critérios de (i) disponibilidade, (ii) custo, (iii) maturidade tecnológica e (iv) compatibilidade técnica, foram elencados oito combustíveis que, em princípio, poderiam ser utilizados para propulsão de navios. Na tabela 3.3, mostra-se a compatibilidade de cada um deles com os diferentes tipos de motores utilizados no setor marítimo [59]. A cor verde indica que a combinação motor-combustível é viável, enquanto a cor vermelha aponta uma combinação considerada impossível. A cor amarela indica incertezas ou restrições na utilização do biocombustível no motor em questão. Note-se que é possível utilizar álcoois (bioetanol e biometanol) em motores diesel (apenas de alta velocidade), com algumas adaptações. Já óleos de pirólise, geralmente muito viscosos, adaptam-se melhor a motores de baixa velocidade [59].

Tabela 3.3: Matriz de compatibilidade técnica entre biocombustíveis e motores
Fonte: [59]

<i>Biocombustível</i>	<i>Faixa de velocidade</i>		
	<i>Alta</i>	<i>Média</i>	<i>Baixa</i>
Óleo vegetal direto (SVO)	Sim	Sim	Sim
Biodiesel	Sim	Sim	Sim
Óleo vegetal hidrotratado (HVO)	Sim	Sim	Sim
Biogás	Sim	Sim	Sim
Bioetanol	Sim	Não	Não
Biometanol	Sim	Não	Não
Dimetil éter (DME)	Sim	Sim	Sim
Bio-óleo de pirólise	Não	Sim	Sim

A partir da tabela 3.3, selecionaram-se seis casos práticos para uma análise mais completa [59], conforme detalhado a seguir.

1. Uso de biodiesel para substituição de MGO em embarcações com motores de baixa e média velocidade (caso de pequenos cargueiros, rebocadores, etc.).
2. Uso de dimetil éter para substituir MGO em todo tipo de navio cargueiro.
3. Uso de óleo vegetal direto (SVO) para substituição de HFO em motores de baixa velocidade (cargueiros de todos os tamanho).
4. Utilização de biogás para substituição de GNL em motores a gás.

5. Uso de bioetanol em motores de alta velocidade (auxiliares ou principais) em navios de curta distância, navios-tanque de etanol ou para produção de eletricidade em navios de passageiro e de cruzeiro.
6. Utilização de bio-óleo de pirólise em motores de baixa velocidade (todos os tamanhos de cargueiros).

Concluiu-se que, de um ponto de vista de integração técnica, pequenas porcentagens (até 20%) de biodiesel em *blends* com MGO e a substituição completa de HFO por óleo vegetal direto constituem os caminhos mais promissores para a introdução de biocombustíveis no setor marítimo, sobretudo por questões ligadas à compatibilidade com os motores atualmente utilizados e à formação de uma cadeia logística [59].

Em relação ao etanol, a principal limitação relaciona-se ao fato de os motores utilizados em navios serem do tipo Diesel. Apesar de haver produção de bioetanol em grandes volumes em diversas partes do mundo e de os custos de integração do setor com portos parecerem administráveis, tal combustível adapta-se melhor à utilização em motores de ciclo Otto. Além de seu reduzido número de cetano e pequeno poder calorífico, o etanol é corrosivo e possui baixa lubrificidade. Todos esses fatores desencorajam seu emprego em motores de ignição por compressão. As rotas de produção de dimetil éter e biogás são tecnologias em ascensão e as quantidades de matéria-prima são, atualmente, limitadas pela biomassa disponível [59].

Conforme será detalhado à frente, nos cenários de biocombustíveis desenvolvidos no capítulo 4, considerou-se a introdução de óleo vegetal direto em motores principais e de biodiesel em motores auxiliares.

Capítulo 4

Metodologia de Cenarização das Emissões de Navios Petroleiros

No capítulo 2, discutiu-se a grande relevância das emissões do transporte marítimo internacional e seu potencial de crescimento nas próximas décadas, enquanto no capítulo 3, avaliou-se a possibilidade de mitigação dessas emissões (tanto por meio de medidas que já estão em curso como por novas ações, como a introdução de biocombustíveis no setor).

Neste capítulo, propõe-se uma metodologia para avaliação quantitativa do referido potencial de mitigação, baseada na criação de cenários de emissões a partir do arcabouço teórico apresentado anteriormente. A ideia dessa cenarização é quantificar os ganhos trazidos por cada medida mitigadora em relação a uma certa referência, construída segundo uma perspectiva *Business as usual*.

A metodologia é desenvolvida especificamente para navios-tanque de petróleo bruto¹, tendo a escolha dessa categoria sido motivada por sua grande importância comercial e pelo fato de tal classe de embarcações se prestar justamente ao transporte de petróleo, o que dialoga com o aspecto ambiental estudado nesta dissertação, já que se trata de uma *commodity* energética de grande protagonismo na questão das mudanças climáticas, sendo o próprio bunker um de seus derivados.

Cabe ressaltar, no entanto, que a metodologia aqui apresentada pode facilmente ser adaptada ao comércio de outros produtos, como grãos, minério de ferro, carvão ou mesmo mercadorias transportadas em porta-contêineres, de modo que se avalie o potencial de mitigação do transporte marítimo internacional como um todo.

Este capítulo está estruturado consoante o fluxograma da figura 4.1, que revela os diferentes passos do procedimento metodológico.

¹Ou seja, petroleiros de óleo cru. A partir deste ponto, referimo-nos a essas embarcações simplesmente pelo termo “navios petroleiros”.

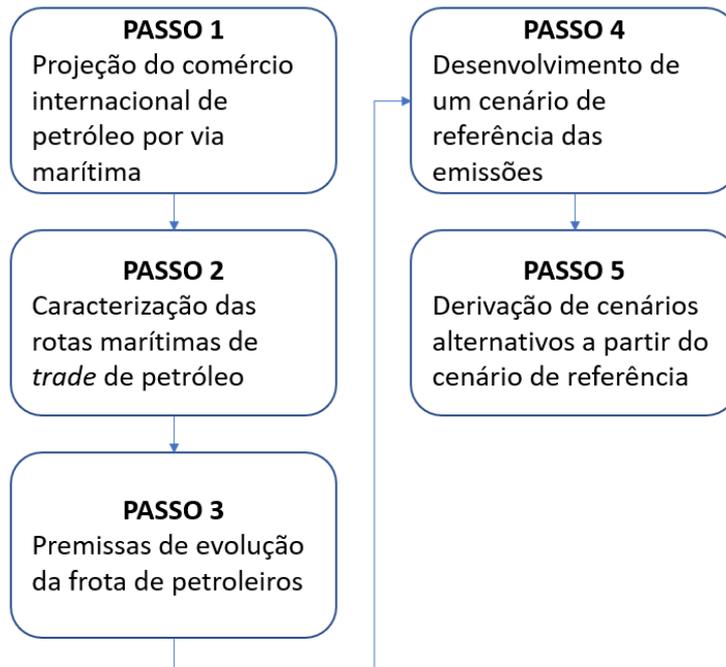


Figura 4.1: Fluxograma do procedimento metodológico
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [69]

O desenvolvimento da metodologia parte de uma projeção do comércio internacional de petróleo por via marítima, cujas hipóteses são descritas na seção 4.1. Em seguida, busca-se caracterizar as diversas rotas marítimas associadas a esse comércio do ponto de vista de navios utilizados, portos de referência e distâncias envolvidas (seção 4.2). Na seção 4.3, apresentam-se as premissas relativas ao sucateamento e renovação da frota. A modelagem energética para elaboração de um cenário de referência é explorada na seção 4.4. Finalmente, na seção 4.5, explicam-se as alterações efetuadas no cenário de referência para a criação de seis cenários alternativos.

4.1 Projeção do *trade* marítimo de petróleo

4.1.1 Mapeamento e seleção das rotas

A fim de mapear as principais rotas marítimas de comércio de petróleo no mundo, utilizou-se como base o Relatório Estatístico de Energia Mundial de 2016 da BP [70], em que estão disponíveis dados relativos aos fluxos comerciais de óleo cru entre as diversas regiões do planeta ao longo de 2015, escolhido como ano-base para o estudo (os dados completos são mostrados na tabela B.1, anexo B). Cabe ressaltar que os fluxos inter-regionais listados no documento não se restringem a movimentos por via marítima, o que representa uma dificuldade adicional, já que o objeto deste estudo é exclusivamente o transporte de óleo bruto por meio de navios.

Apesar de as vias marítimas constituírem as principais artérias do comércio internacional de petróleo [14], há exceções. É o caso, por exemplo, das exportações canadenses para os Estados Unidos. Estando os dois países separados por uma enorme fronteira terrestre, verifica-se que os movimentos de óleo ocorrem predominantemente por meio do modal dutoviário [71]. Analogamente, a maior parte das exportações russas para o Leste Europeu e para a Alemanha ocorre através de um complexo sistema de dutos [72]. Da mesma forma, uma parcela considerável do petróleo importado pela China vem de oleodutos russos e cazaques [73]. Naturalmente, movimentos como esses foram excluídos² da análise para seleção de rotas marítimas (tabela 4.1).

Tabela 4.1: Movimentos de óleo cru excluídos da análise por não envolverem, por hipótese, utilização do transporte marítimo

<i>Origem</i>	<i>Destino</i>	<i>Trade 2015 (Mt)</i>
Canadá	Estados Unidos	157,8
Rússia	Europa	*79,3
Rússia	China	*14,1
Rússia	Outros-CEI	23,2
Estados Unidos	Canadá	21,0
Outros-CEI	China	5,3
Total		300,7

Note-se que, conforme indica a tabela 4.1, no caso das exportações da Rússia para a Europa e para a China, as quantidades de petróleo a serem desconsideradas são apenas parcelas dos números originais da figura 4.2, uma vez que, nesses casos, o movimento inter-regional dá-se tanto por sistemas dutoviários quanto pela via marítima.

²No caso das exportações da Rússia para a China, o fluxo não foi completamente excluído, conforme será detalhado mais adiante.

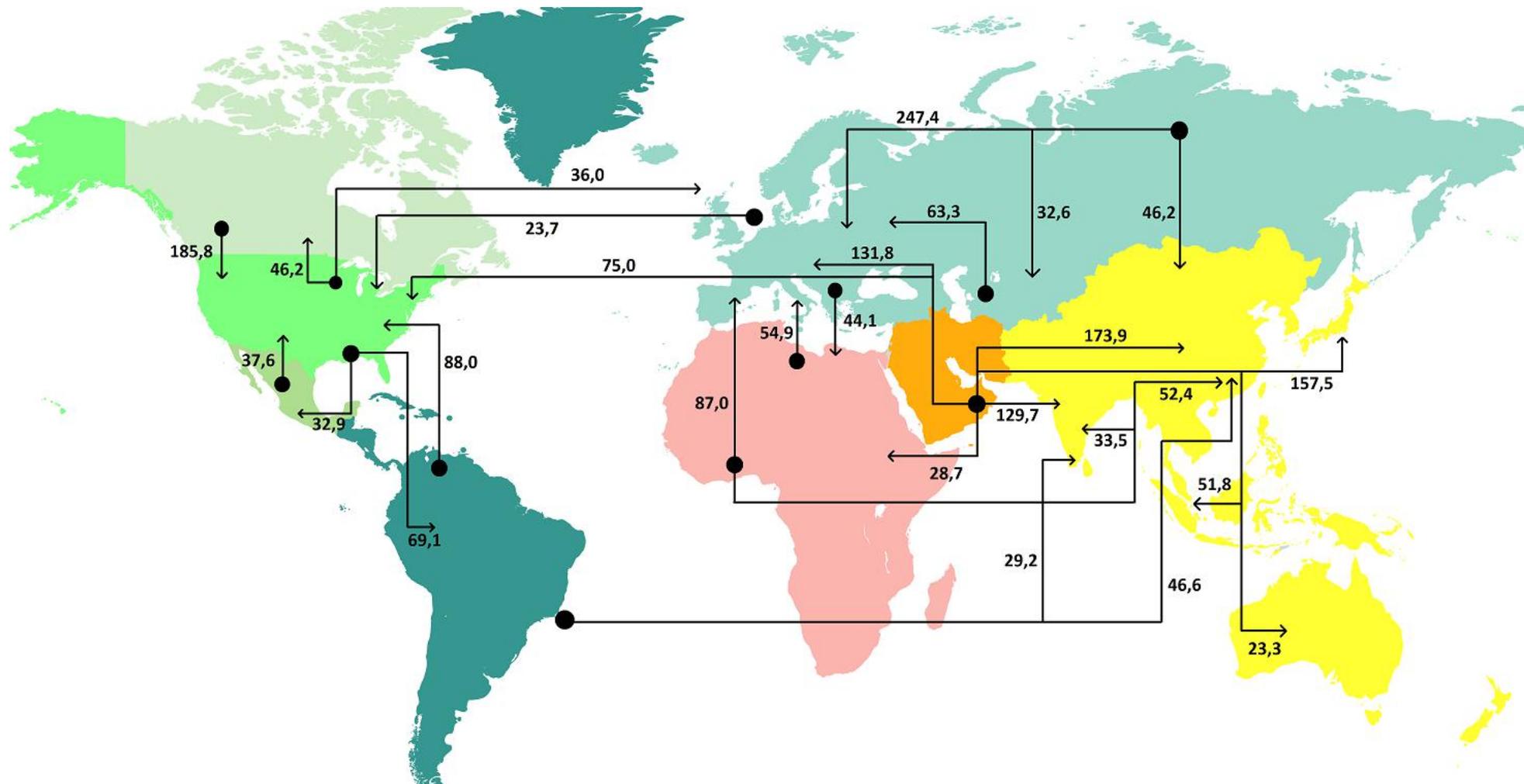


Figura 4.2: Principais fluxos inter-regionais de petróleo em 2015
Fonte: Elaboração própria a partir de [74] com base em figura de [70]

Tome-se, por exemplo, o caso europeu: parte das exportações russas atende à porção oriental do continente por meio de oleodutos. No entanto, países como França, Espanha e Portugal recebem petróleo russo por via marítima [75] e tais movimentos não devem ser excluídos dos cálculos. Dada a dificuldade de precisar a repartição das exportações entre oleodutos e navios, considerou-se uma divisão 50%/50%.

No que diz respeito à China, a situação é semelhante: o país importa petróleo através do oleoduto Sibéria - Pacífico (que tem um ramo com acesso direto ao norte da China e um ramo que se estende até o Mar do Japão³) [73], mas também importa óleo do tipo Urals (proveniente da Rússia Ocidental [76]) por via marítima. Nesse caso, optou-se por estabelecer uma divisão em três terços iguais⁴.

Ainda que se descontem da matriz de *trade* representada pela figura 4.2 os movimentos por oleoduto, resta mais de uma centena de movimentos inter-regionais associados ao óleo cru. É interessante notar, no entanto, que a distribuição dos fluxos é bastante heterogênea: grande parte do volume total transacionado concentra-se em alguns grandes corredores comerciais, enquanto o restante encontra-se disperso em inúmeras rotas secundárias. Tal concentração é bem ilustrada pelo caso do Oriente Médio, origem de 44% do total de petróleo exportado entre as áreas definidas [70].

No caso de uma análise quantitativa, presume-se que o peso das principais rotas seja muito maior, sendo portanto razoável não estudar os fluxos marginais caso a caso. Assim, no âmbito desta dissertação, optou-se por limitar o estudo aos movimentos de óleo cru iguais ou superiores a cinco milhões de toneladas (5,0 Mt) anuais. Juntos, os fluxos que atendem a esse critério respondem por 94% do total de movimentos inter-regionais por via marítima [70].

A tabela 4.2 sintetiza os cálculos efetuados para identificação dos volumes associados às principais rotas: partindo-se do total inter-regional apontado pelo *review* da BP, descontou-se o montante que, por hipótese, foi atribuído aos oleodutos (300,7 Mt, conforme indica a tabela 4.1), chegando-se a um total inter-regional por via marítima igual a 1.677 Mt (dos quais 1.586 Mt associados a fluxos anuais iguais ou superiores a 5,0 Mt).

³Nesse caso, o petróleo ainda percorre uma distância em navios até a costa chinesa.

⁴Ou seja, apenas dois terços são considerados no âmbito do transporte marítimo.

Tabela 4.2: Cálculo dos fluxos inter-regionais e intra-regionais (números em Mt)

<i>Total inter-regional</i>	1977,2
<i>Oleodutos</i>	-300,7
<i>Total inter-regional via marítima</i>	1676,5
<i>Total inter-regional via marítima $\geq 5,0$ Mt</i>	1585,8
<i>Fluxos abaixo de 5,0 Mt</i>	+89,7
<i>Movimentos intra-regionais</i>	+95,5
<i>Total via marítima</i>	1771,0

Estimou-se ainda o total de petróleo comercializado em movimentos intra-regionais, não captados pela análise do relatório da BP. Para tanto, utilizou-se um dado do Relatório do Transporte Marítimo de 2016 da UNCTAD [77], segundo o qual o comércio marítimo de petróleo bruto atingiu a marca de 1771,0 Mt em 2015. A diferença entre esse valor e o total inter-regional corresponde à estimativa do total de fluxos intra-regionais em todo o mundo.

Feita a distinção entre movimentos intra-regionais e inter-regionais e separados os fluxos inferiores a 5,0 Mt, foi possível selecionar as principais rotas de comércio internacional de petróleo (tabela 4.3).

Note-se que, em alguns casos, os dados da figura 4.2 foram desagregados em duas rotas. Tal divisão foi motivada pelo fato de determinadas regiões conterem sub-regiões geograficamente distantes umas das outras, de modo que considerar as exportações ou importações concentradas em uma delas constituiria significativa perda de informação.

Tome-se, como exemplo, o dado referente às exportações da Américas Central e do Sul para os Estados Unidos (79,7 Mt): os principais exportadores sul-americanos são Venezuela, Colômbia, Equador e Brasil [70]. Ao considerarmos os três primeiros como um bloco, não há grande perda de informação, já que as distâncias de cada país aos EUA são da mesma ordem de grandeza. O mesmo não pode ser dito em relação ao Brasil, cujas exportações têm origem em portos muito menos próximos à América do Norte. Dessa maneira, optou-se por distinguir a rota 04, Caribe - EUA, da rota 08, Brasil - EUA, conforme mostra a figura 4.3. As quantidades de petróleo alocadas em cada rota foram definidas com base nos dados de [75], segundo os quais as importações norte-americanas de óleo cru advindas da América do Sul repartem-se de acordo os seguintes percentuais: Venezuela (43%), Colômbia (29%), Equador (16%), Brasil (10%) e outros (2%). Similarmente, o fluxo América do Sul - China foi repartido entre as rotas 06 (Caribe - China) e 09 (Brasil - China).

Tabela 4.3: As 37 principais rotas marítimas de comércio de petróleo bruto em 2015

<i>Rota</i>	<i>Região exportadora</i>	<i>Região importadora</i>	<i>Trade (Mt)</i>
01	México	EUA	34,3
02	México	Europa	13,7
03	México	Índia	6,3
04	Caribe	EUA	72,7
05	Caribe	Europa	14,6
06	Caribe	China	25,9
07	Caribe	Índia	29,2
08	Brasil	EUA	7,0
09	Brasil	China	15,8
10	CEI - Cáucaso	Europa Setentrional	75,6
11	CEI - Cáucaso	Europa Meridional	59,7
12	CEI - Cáucaso	China	14,1
13	CEI - Sibéria	China	14,1
14	CEI - Sibéria	Japão	15,2
15	CEI - Sibéria	Coreia do Sul	16,1
16	Oriente Médio	EUA	74,1
17	Oriente Médio	Europa Setentrional	43,3
18	Oriente Médio	Europa Meridional	65,0
19	Oriente Médio	África do Sul	12,9
20	Oriente Médio	Oceania	6,3
21	Oriente Médio	China	170,4
22	Oriente Médio	Índia	114,5
23	Oriente Médio	Japão	139,7
24	Oriente Médio	Coreia do Sul	93,1
25	Oriente Médio	Sudeste Asiático	130,6
26	Maghreb	Europa Setentrional	51,2
27	Maghreb	Europa Meridional	34,1
28	Oeste Africano	EUA	13,6
29	Oeste Africano	Brasil	10,8
30	Oeste Africano	Europa Setentrional	38,4
31	Oeste Africano	Europa Meridional	47,0
32	Oeste Africano	China	52,3
33	Oeste Africano	Índia	33,5
34	Oeste Africano	Sudeste Asiático	13,3
35	Leste Africano	China	8,3
36	Oceania	Sudeste Asiático	5,0
37	Sudeste Asiático	Oceania	14,1
38	-	[Abaixo 5,0 Mt]	89,7
39	-	[Intra-regional]	95,5
Total	-	-	1771,0

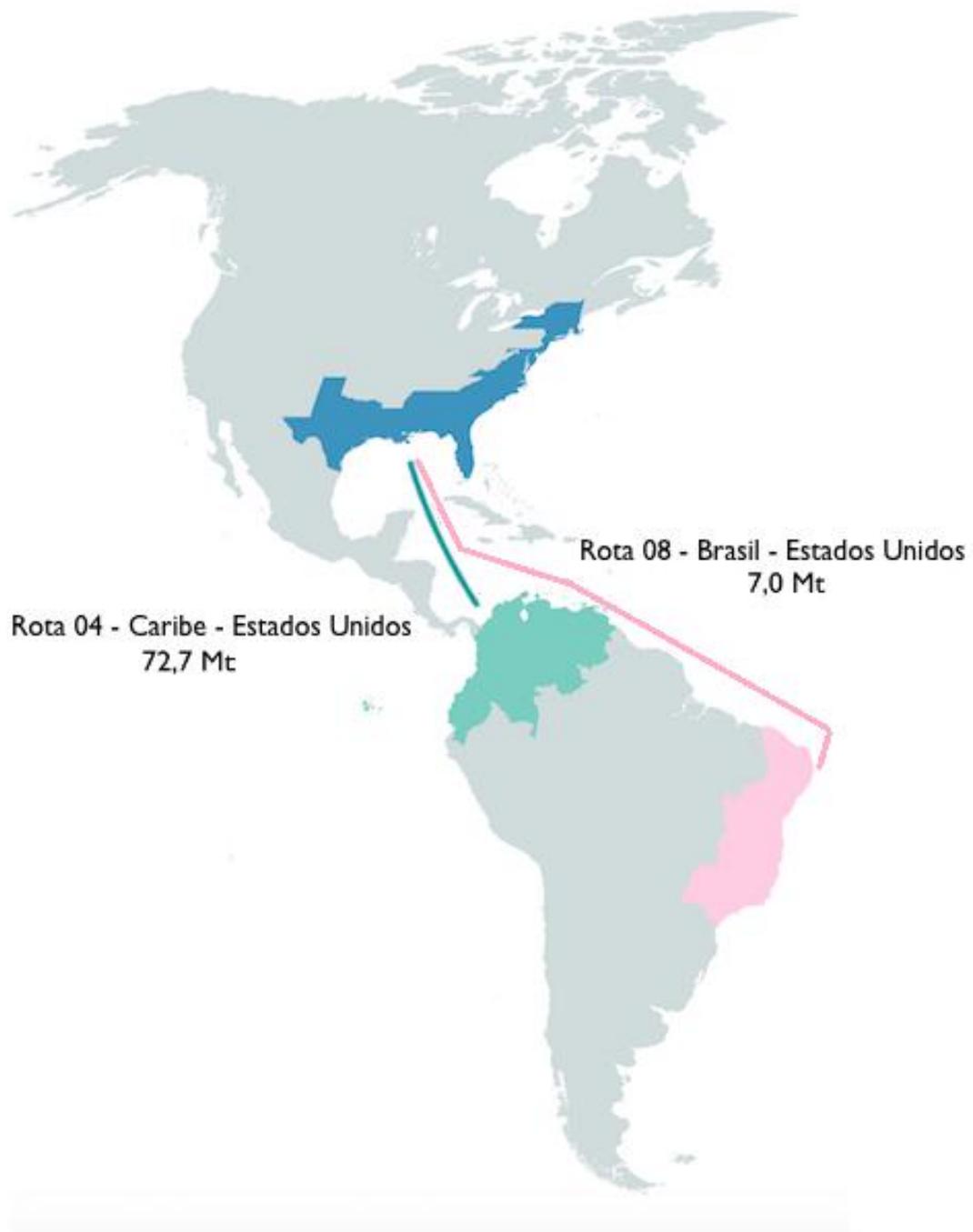


Figura 4.3: Desagregação do fluxo Américas Central e do Sul - EUA em duas rotas
Fonte: Elaboração própria

O mesmo método foi aplicado aos casos de rotas envolvendo importações europeias⁵: no *review* da BP, os números relativos à Europa são apresentados de maneira agregada. Tendo em vista que as rotas marítimas destinadas à parte setentrional do continente são, em geral, consideravelmente mais longas do que aquelas cujos destinos são portos do Mar Mediterrâneo, optou-se por estabelecer essa distinção (rotas 10, 11, 17, 18, 26, 27, 30 e 31).

Deve-se ainda tecer comentários a respeito das rotas 10, 11, 12, 13, 14 e 15: trata-se de fluxos que agregam as exportações da Rússia e da Ásia Central (sobretudo Cazaquistão [75]). Uma vez que os caminhos marítimos que partem dessas duas regiões são bastante semelhantes⁶, definiu-se a região CEI, relacionada às seis referidas rotas. A região CEI é marcada por contar com dois polos de exportação, um no Mar Negro (Cáucaso) e um no Mar do Japão (Sibéria) [73].

Finalmente, cabe elucidar o significado das rotas 38 e 39. Conforme mostra a tabela 4.3, essas não são rotas reais, mas produtos de um recurso metodológico visando à inclusão das rotas secundárias (38) e dos fluxos marítimos intra-regionais (39) na análise. Ao se criar esse par de rotas virtuais, garante-se que o estudo abranja todo o comércio marítimo internacional de petróleo de 2015.

⁵À exceção dos fluxos partindo do México, pois as distâncias do país à Europa Setentrional e à Europa Meridional são praticamente iguais.

⁶Considerando-se rotas que partem do Mar Negro.

4.1.2 Projeção do *trade* por rota

Para que se construam cenários de emissões de CO₂ por navios petroleiros, é fundamental que haja dados sobre a evolução do comércio marítimo de óleo bruto ao longo dos anos. Tal informação é necessária para a determinação do tamanho da frota e do número de viagens por ano em cada rota, essenciais para o cálculo do consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões de dióxido de carbono.

A dinâmica do comércio internacional de óleo cru não obedece rigorosamente às leis de mercado. Sendo o petróleo uma *commodity* não homogênea fortemente atrelada a fatores geopolíticos [78], o estudo dos fluxos de importação e exportação desse produto não pode limitar-se a uma análise baseada em custos e preços. Desde o surgimento da indústria petrolífera, a comercialização global de óleo passou por uma complexa evolução, marcada pela passagem de padrões bilaterais de *trade* para os atuais padrões multilaterais [79].

Idealmente, para se projetar a evolução do comércio internacional de petróleo, dever-se-ia levar em conta os diferentes tipos de óleo cru, o desenvolvimento do parque refinador mundial e até mesmo aspectos não técnicos, como a dimensão geopolítica do setor. Nesse sentido, a utilização de *Integrated Assessment Models* (IAMs) poderia ser bastante útil. No entanto, o uso de uma tal ferramenta foge do escopo do presente estudo e assim, optou-se por projetar a evolução das rotas selecionadas na subseção 4.1.1 de maneira simplificada. A abordagem adotada baseia-se nas seguintes hipóteses:

- considera-se que as rotas elencadas na tabela 4.3 mantêm-se como as principais vias do comércio marítimo de petróleo bruto;
- considera-se que a razão entre petróleo importado por via marítima e demanda líquida total de cada importador mantém-se constante ao longo dos anos;
- finalmente, assume-se que, em todos os anos, a participação percentual de cada exportador nas importações de dado país/região seja igual à de 2015⁷.

A fim de estimar a demanda líquida por óleo cru, consideraram-se os dados do cenário de referência de longo prazo da OPEP [80]. Segundo essa projeção, que se estende até 2040, a evolução da demanda por petróleo ocorrerá conforme mostra a tabela 4.4 e a produção interna⁸ de cada região ocorrerá de acordo com os números⁹ da tabela 4.5.

⁷Trata-se da hipótese mais frágil desta projeção, uma vez que o crescimento da produção de petróleo em alguns países (ex: Brasil) pode alterar significativamente este balanço.

⁸A tabela de oferta não contabiliza apenas a produção interna de petróleo, mas também de outros líquidos, como biocombustíveis.

⁹A soma das linhas não coincide exatamente com aquela apontada pela tabela por se ter ocultado a variação de estoque.

Tabela 4.4: Projeção da demanda de petróleo bruto por região

Fonte: [80]

	<i>Milhões de barris por dia (mb/d)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
OCDE América	24,4	24,8	24,0	22,8	21,5	20,1
OCDE Europa	13,7	13,5	13,0	12,4	11,8	11,1
OCDE Ásia/Oceania	8,1	7,7	7,3	6,9	6,5	6,1
OCDE	46,2	45,9	44,3	42,1	39,7	37,3
América Latina	5,6	6,0	6,4	6,7	7,0	7,3
Oriente Médio e África	3,8	4,2	4,6	5,1	5,5	6,0
Índia	4,1	5,1	6,4	7,7	9,0	10,4
China	10,8	12,2	13,6	14,9	16,1	17,1
Outros, Ásia	6,3	7,1	7,9	8,7	9,3	9,8
OPEP	10,9	12,2	13,3	14,3	15,0	15,4
Países em desenvolvimento	41,5	46,8	52,2	57,4	62,0	66,1
Rússia	3,4	3,5	3,6	3,6	3,6	3,5
Outros, Eurásia	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	2,5
Eurásia	5,3	5,6	5,8	6,0	6,1	6,0
Mundo	93,0	98,3	102,3	105,5	107,8	109,4

Tabela 4.5: Projeção da oferta de líquidos por região

Fonte: [80]

	<i>Milhões de barris por dia (mb/d)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
EUA e Canadá	18,4	18,9	21,2	21,5	21,1	20,5
México e Chile	2,6	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9
OCDE Europa	3,8	3,5	3,3	3,2	3,0	2,9
OCDE Ásia/Oceania	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
OCDE	25,2	25,2	27,3	27,3	26,7	25,9
América Latina	5,2	6,0	6,8	6,8	6,6	6,4
Oriente Médio e África	3,4	3,6	3,6	3,5	3,3	3,2
Ásia, exceto China	2,7	2,8	2,7	2,6	2,4	2,2
China	4,4	4,2	4,1	3,9	3,7	3,5
Países em desenvolvimento*	15,7	16,6	17,3	16,8	16,0	15,3
Rússia	10,8	10,8	10,9	10,9	10,9	10,9
Outros, Eurásia	3,0	3,0	3,2	3,5	3,7	3,9
Eurásia	13,8	13,8	14,1	14,4	14,6	14,7
OPEP	38,2	40,6	41,5	44,6	47,9	50,7
Mundo**	95,1	98,5	102,5	105,7	108,0	109,6

*exceto OPEP

Com base nesse cenário de oferta e demanda, construiu-se a tabela 4.6, que contém a evolução da demanda líquida de todos os importadores das rotas selecionadas (tabela 4.3). Note-se que foram desprezadas as exportações dos grandes importadores¹⁰, ou seja, a demanda líquida foi calculada diretamente pela diferença

$$\text{Demanda líquida} = \text{Demanda total} - \text{Oferta doméstica.} \quad (4.1)$$

Tabela 4.6: Projeção da demanda líquida para os principais importadores

	<i>Milhões de toneladas por ano (Mt/ano)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
China	319	398	473	548	518	677
Índia	159	214	279	349	413	488
Japão	155	147	143	135	127	119
Coreia do Sul	109	104	99	94	88	83
África do Sul	31	34	37	41	45	49
Estados Unidos	202	196	57	-8	-45	-77
Europa	493	498	483	458	438	408
Brasil	25	-4	-33	-25	-12	-4
Oceania	57	48	44	46	42	38
Sudeste Asiático	179	214	259	304	344	378

A demanda líquida em si não basta, no entanto, para o cálculo da projeção do *trade* nas principais rotas, já que, pelos motivos explicados na subseção 4.1.1 (importações que não ocorrem por via marítima, desconsideração de rotas secundárias, etc.), esse número não coincide com a soma dos fluxos marítimos destinados ao país em questão. Considere-se o exemplo das importações chinesas: de acordo com a tabela 4.6, a demanda líquida por óleo bruto do país em 2015 atingiu 319 Mt. Por outro lado, de acordo com os dados da tabela 4.3, as sete rotas que envolvem importações da China (tabela 4.7) somaram 301 Mt no mesmo ano.

¹⁰Desconsiderou-se, na realidade, a existência de diferentes qualidades de cru e tipos de par- que refinador, o que faz com que muitos países, a exemplo dos Estados Unidos, sejam grandes exportadores e, ao mesmo tempo, grandes importadores.

Tabela 4.7: As sete rotas envolvendo importações da China em 2015

<i>Rota</i>	<i>Exportação</i>	<i>Importação</i>	<i>Trade (Mt)</i>
06	Caribe	China	25,9
09	Brasil	China	15,8
12	CEI (C)	China	14,1
13	CEI (S)	China	14,1
21	O. Médio	China	170,4
32	O. Africano	China	52,3
35	L. Africano	China	8,3
Total	-	-	300,9

Assim sendo, com vistas a projetar não só a demanda líquida, mas também a soma das importações envolvendo as principais rotas entre 2015 e 2040, optou-se por considerar uma proporção fixa entre esses dois valores. No que diz respeito à repartição entre exportadores, optou-se por manter os percentuais observados em 2015 (o cálculo referente à China é mostrado na tabela 4.8 a título de exemplo¹¹).

Tabela 4.8: Projeção das exportações por rotas tendo como destino a China

<i>Rota</i>	<i>Milhões de toneladas por ano (Mt/ano)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
06	26	33	39	45	51	55
09	16	20	24	27	31	34
12	14	18	21	24	28	30
13	14	18	21	24	28	30
21	170	214	254	295	332	365
32	52	66	78	91	102	112
35	8	10	12	14	16	18
Total	302	378	449	521	587	644

Para as rotas virtuais (38 e 39), a evolução do *trade* baseou-se na média ponderada das variações percentuais dos fluxos das demais rotas (ponderação pelo valor do *trade* em 2015).

Note-se ainda que alguns valores da tabela 4.6 são negativos, o que quer dizer que os países implicados (no caso, Estados Unidos e Brasil) passarão a ser exportadores líquidos de petróleo. Do ponto de vista do método adotado, tais valores não têm sentido e assim, considerou-se o *trade* das rotas envolvidas caindo a zero. Contudo, a fim de não desprezar os eventuais novos fluxos gerados pelo excedente desses países, transferiram-se tais valores, com sinal trocado, para a rota 38, que representa justamente as rotas inter-regionais não identificadas.

¹¹Note-se que a variação percentual ano a ano é a mesma para todas as rotas.

Na figura 4.4, veem-se exemplos de evolução do *trade* para diferentes rotas: um forte crescimento é observado na rota 33 (Oeste Africano - Índia), devido ao grande aumento de demanda projetado para Índia. Já na rota 26 (Maghreb - Europa, Sul), percebe-se uma ligeira diminuição no fluxo ao longo dos anos, enquanto a rota 04 (Caribe - Estados Unidos) deixa de existir a partir de 2030.

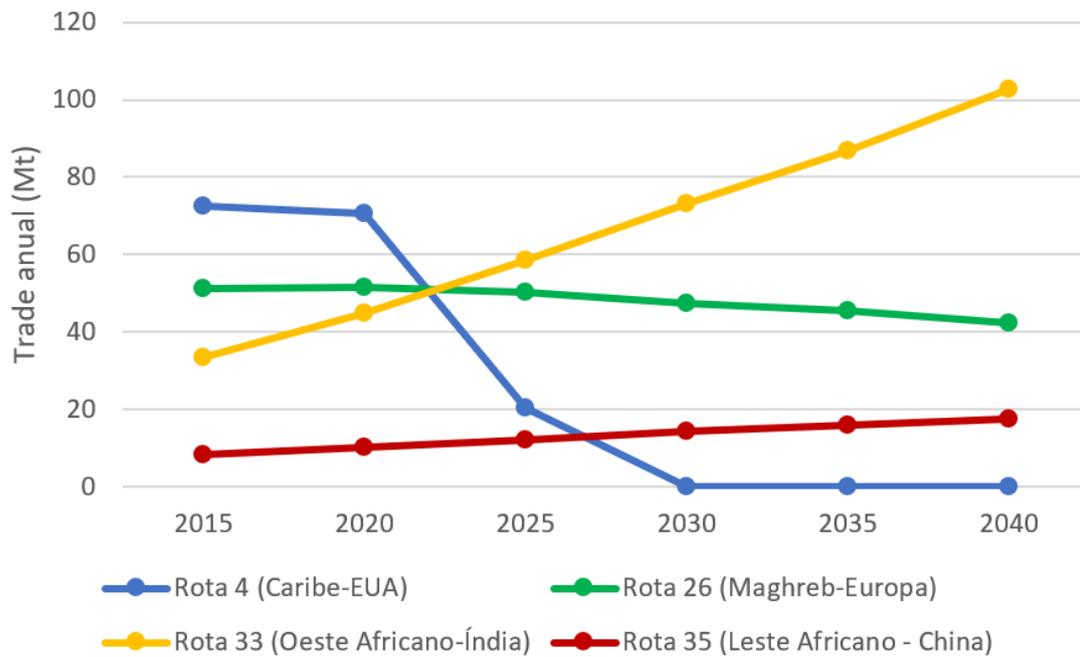


Figura 4.4: Evolução do *trade* em rotas selecionadas
Fonte: Elaboração própria

4.2 Caracterização das rotas marítimas de comércio de petróleo

4.2.1 Portos de referência e cálculo de distâncias

Cada uma das rotas apresentadas na subseção 4.1.1 envolve dezenas de portos, tanto na origem como no destino, isto é, em uma mesma rota, existem trajetos ligeiramente diferentes. Considere-se, por exemplo, a rota 28 (Oeste Africano - Estados Unidos), que representa as exportações de Nigéria e Angola¹² para a Costa Leste Americana e para o Golfo do México: a rigor, existem inúmeras rotas associadas a esse fluxo, já que os navios-tanque partem de terminais distintos (Forçados, Escravos, Bonny, Luanda, entre outros - figura 4.5) rumo a múltiplos destinos (Filadélfia, Galveston, Port Fourchon, etc.) [81][82][83][84].

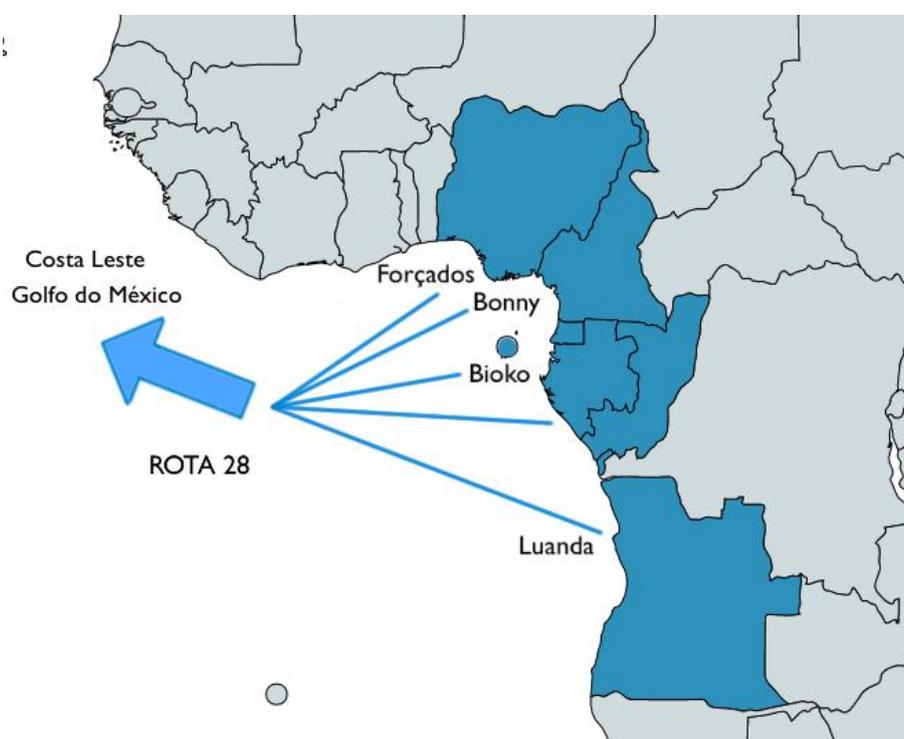


Figura 4.5: Portos de origem da rota 28

Fonte: Elaboração própria

No entanto, trabalhar nesse nível de desagregação fugiria ao escopo deste trabalho e pouco enriqueceria os resultados, uma vez que as distâncias entre os portos de uma mesma região são pequenas se comparadas às distâncias inter-regionais.

¹²Além de países com volumes de exportação mais modestos, como Guiné Equatorial e Gabão.

Assim, optou-se por eleger portos de referência para cada região exportadora ou importadora. Desse modo, do ponto de vista da modelagem, todos os navios de dada rota saem de um mesmo porto e chegam a um único porto. Procurou-se aplicar um critério de importância comercial durante a escolha dos portos. No caso do exemplo mencionado, o trajeto considerado é Bonny - Port Fourchon. As tabelas 4.9 e 4.10 listam, respectivamente, os portos de referência de exportação e de importação.

Tabela 4.9: Portos de referência para exportação

<i>Região</i>	<i>Porto</i>	<i>Referência</i>
México	Coatzacoalcos	[85]
Caribe	Puerto Miranda	[86]
Brasil	Açu	[87]
CEI - Cáucaso	Novorossiysk	[88]
CEI - Sibéria	Kozmino	[89]
Oriente Médio	Juaymah	[90]
Maghreb	Arzew	[91]
Oeste Africano	Bonny	[82]
Leste Africano	Port Sudan	[92]
Oceania	Brisbane	[93]
Sudeste Asiático	Seria	[94]

Tabela 4.10: Portos de referência para importação

<i>Região</i>	<i>Porto</i>	<i>Referência</i>
Estados Unidos	Port Fourchon	[84]
Europa Setentrional	Rotterdam	[95]
Europa Meridional	Trieste	[96]
Índia	Kandla	[97]
China	Qingdao	[98]
Japão	Chiba	[99]
Coreia do Sul	Yeosu	[100]
África do Sul	Saldanha	[101]
Brasil	São Sebastião	[102]
Sudeste Asiático	Singapore	[103]
Oceania	Brisbane	[93]

Uma vez determinados os portos de referência, calculou-se, por meio de cartas náuticas *online* [52], a distância associada a cada rota. Os números¹³ são mostrados na tabela 4.11. Note-se que também foram atribuídos valores para as distâncias das rotas virtuais. Naturalmente, não se trata de valores medidos. No caso da rota 38 (fluxos inter-regionais abaixo de 5,0 Mt em 2015), optou-se por considerar uma distância igual à média daquelas associadas às 37 maiores rotas. À rota 39 (referente aos movimentos intra-regionais), atribuiu-se arbitrariamente a distância de 2.000 milhas náuticas.

¹³As distâncias mostradas estão em milhas náuticas. Uma milha náutica equivale a 1.852 m.

Tabela 4.11: Distâncias entre portos de referência

<i>Rota</i>	<i>Porto de origem</i>	<i>Porto de destino</i>	<i>Distância (mn)</i>
01	Coatzacoalcos	Port Fourchon	680
02	Coatzacoalcos	Rotterdam	5.052
03	Coatzacoalcos	Kandla	9.636
04	Puerto Miranda	Port Fourchon	1.789
05	Puerto Miranda	Rotterdam	4.413
06	Puerto Miranda	Qingdao	9.283
07	Puerto Miranda	Kandla	8.746
08	Suape	Port Fourchon	4.207
09	Suape	Qingdao	11.213
10	Novorossiysk	Rotterdam	3.617
11	Novorossiysk	Trieste	1.608
12	Novorossiysk	Qingdao	8.719
13	Kozmino	Qingdao	1.001
14	Kozmino	Chiba	952
15	Kozmino	Yosu	591
16	Juaymah	Port Fourchon	9.800
17	Juaymah	Rotterdam	11.169
18	Juaymah	Trieste	4.456
19	Juaymah	Saldanha	5.073
20	Juaymah	Brisbane	7.453
21	Juaymah	Qingdao	6.164
22	Juaymah	Kandla	1.177
23	Juaymah	Chiba	6.608
24	Juaymah	Yosu	6.158
25	Juaymah	Singapore	3.701
26	Arzew	Rotterdam	1.618
27	Arzew	Trieste	1.416
28	Bonny	Port Fourchon	6.123
29	Bonny	São Sebastião	3.522
30	Bonny	Rotterdam	4.386
31	Bonny	Trieste	4.957
32	Bonny	Qingdao	10.317
33	Bonny	Kandla	7.099
34	Bonny	Singapore	8.000
35	Port Sudan	Qingdao	5.931
36	Brisbane	Singapore	3.842
37	Seria	Brisbane	3.608
38	-	-	5.246
39	-	-	2.000

4.2.2 Definição da categoria de petroleiro por rota

Conforme discutido no capítulo 2, o transporte comercial de petróleo e derivados é feito por meio de navios-tanque ou, mais especificamente, por navios petroleiros. Existem diversas categorias de petroleiros e o que define cada uma são as dimensões do casco e sobretudo a faixa de expoente de carga¹⁴, ou seja, a quantidade de petróleo ou derivados que navios da categoria estão aptos a transportar. De acordo com a classificação mais comum, as categorias são aquelas mostradas na tabela 4.12 [35].

Tabela 4.12: Categorias de navios petroleiros

<i>Categoria</i>	<i>Porte (dwt)</i>
Pequenos petroleiros	até 10 000
Handysize	10 000 - 30 000
Handymax	30 000 - 55 000
Panamax	60 000 - 75 000
Aframax	80 000 - 120 000
Suezmax	125 000 - 170 000
VLCC	250 000 - 320 000
ULCC	acima de 350 000

Navios de menor porte (pequenos petroleiros, Handysize e Handymax) são geralmente empregados no transporte de derivados, enquanto VLCCs e ULCCs destinam-se exclusivamente ao transporte de petróleo bruto. Os navios de categorias intermediárias servem tanto ao transporte de derivados como ao transporte de óleo cru [35].

Neste estudo, cujo foco é o transporte de petróleo bruto, decidiu-se trabalhar apenas com as categorias Panamax, Aframax, Suezmax e VLCC¹⁵.

É difícil determinar precisamente quantos navios de cada tipo operam em cada rota. No entanto, existem informações acerca de categorias tipicamente utilizadas em algumas rotas. O transporte de petróleo bruto a partir do Golfo Pérsico, por exemplo, geralmente é feito por meio de VLCCs [104]. Exceções a essa regra são as rotas que passam pelo Portão das Lágrimas¹⁶ e pelo Canal de Suez, cujas dimensões permitem, no máximo, o trânsito de navios Suezmax. [105].

¹⁴O porte ou expoente de carga de uma embarcação refere-se à máxima carga variável (peso morto) que pode ser transportada. Geralmente, é expressa em toneladas de peso morto (dwt).

¹⁵Cabe aqui um parêntesis a respeito dos ULCCs: os primeiros navios desse tipo foram construídos nos anos 1970, constituindo, à época, uma pequena parcela da frota de navios-tanque. Nos anos 2000, houve nova tentativa de impulsionar o mercado, mas os ULCCs nunca conquistaram um *market share* significativo. Atualmente, são mais usados como unidades de armazenamento flutuantes e não existem perspectivas de crescimento da frota.

¹⁶O *Bab-el-Mandeb* ou Portão das Lágrimas é o estreito que separa a Península Arábica do Chifre da África.

Já no Mediterrâneo e no Mar Negro, o *trade* ocorre principalmente com navios Aframax [106]. A rota Caribe - Golfo do México, por sua vez, está predominantemente associada à categoria Panamax [107].

Desse modo, na modelagem desenvolvida nesta dissertação, optou-se por associar cada rota a uma categoria. Para tanto, foram tomadas como base informações do Relatório de Transporte Marítimo da Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento [77] e da Bolsa do Báltico¹⁷ [108], além de fontes secundárias [109]. Assim, construiu-se a tabela 4.13.

Observe-se que também foram atribuídas categorias típicas às rotas virtuais 38 e 39. A rota 38 agrega fluxos secundários, que dificilmente envolveriam navios de porte muito grande. Assim, optou-se por vinculá-la à categoria Aframax, a mais numerosa entre petroleiros. À rota 39 associou-se a categoria Panamax (curtas distâncias, pequenos volumes).

Note-se ainda que a categoria associada a cada rota foi mantida constante ao longo dos anos, isto é, não se considera a possibilidade de mudança no tipo de embarcação utilizada entre 2015 e 2040.

¹⁷Trata-se de uma associação da indústria marítima que funciona como provedor independente de informações.

Tabela 4.13: Categoria de petroleiro associada a cada rota

<i>Rota</i>	<i>Categoria</i>
01	Panamax
02	Aframax
03	Suezmax
04	Panamax
05	Aframax
06	Panamax
07	Aframax
08	Aframax
09	Suezmax
10	Aframax
11	Aframax
12	Suezmax
13	Suezmax
14	Suezmax
15	Suezmax
16	VLCC
17	VLCC
18	Suezmax
19	Suezmax
20	Aframax
21	VLCC
22	Suezmax
23	VLCC
24	VLCC
25	VLCC
26	Aframax
27	Aframax
28	VLCC
29	Aframax
30	VLCC
31	Aframax
32	VLCC
33	Suezmax
34	VLCC
35	Suezmax
36	Aframax
37	Aframax
38	Aframax
39	Panamax

4.3 Premissas de evolução da frota

Nesta seção, apresenta-se a metodologia adotada para projeção da frota de navios-tanque de petróleo bruto ao longo do período considerado, comum aos sete cenários¹⁸.

Listam-se, a seguir, as principais hipóteses referentes a esta parte do trabalho:

- assume-se que não haja superdimensionamento ou subdimensionamento da frota de petroleiros em 2015, *i.e.*, considera-se que a quantidade existente de navios desse tipo corresponda exatamente à demanda por transporte marítimo no ano-base, sem que haja capacidade ociosa ou sobrecarga;
- supõe-se que o perfil etário das frotas das quatro categorias estudadas de petroleiros seja o mesmo;
- considera-se que as frotas das diferentes categorias evoluam de maneira independente, ou seja, supõe-se que o crescimento do número de navios de certo tipo dependa exclusivamente do comércio de petróleo em rotas associadas à referida categoria (de acordo com a tabela 4.13). Assume-se uma proporcionalidade entre *trade* total e número de navios de cada categoria.

Na subseção 4.3.1, caracteriza-se a frota de petroleiros existente em 2015 e expõe-se o método adotado para determinar a sobrevivência desses navios até 2040.

Em seguida, na subseção 4.3.2, projeta-se o crescimento do número total de navios ao longo desse período.

Na subseção 4.3.3, explica-se como, a partir dos passos descritos em 4.3.1 e 4.3.2, foi modelada a entrada de novas embarcações.

Finalmente, na subseção 4.3.4, explicita-se o critério utilizado para repartição dos navios pelas rotas. Trata-se de uma etapa fundamental do cálculo das emissões de motores auxiliares e caldeiras.

¹⁸Embora, de maneira geral, a metodologia de projeção da frota seja a mesma para todos os casos, uma pequena modificação é introduzida em cenários de *slow steaming*. Essa nuance será explorada mais à frente.

4.3.1 Frota em 2015

Primeiramente, procurou-se determinar a frota de cada categoria no ano-base. De acordo com relatórios de mercado [110], a frota mundial de navios-tanque de petróleo bruto em 2015 era composta por 1.956 embarcações.

Para determinar a quantidade de navios Panamax, Aframax, Suezmax e VLCC, recorreu-se a dados de anos anteriores: a partir de diferentes fontes, chegou-se a percentuais de repartição entre as categorias de petroleiros muito semelhantes para os anos de 2007 [35] e 2012 [26]. Concluiu-se que, ao longo da última década, a proporção de cada categoria manteve-se aproximadamente constante e, assim, achou-se por bem manter tais percentuais para o ano de 2015. Na figura 4.6, são mostrados os percentuais associados a cada categoria¹⁹.

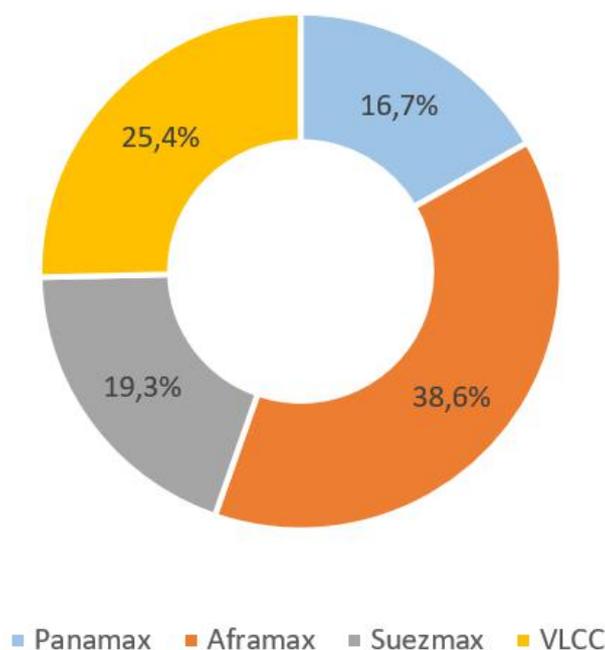


Figura 4.6: Percentual de petroleiros em cada categoria em 2012

Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [35] e [26]

Na tabela 4.14, apresentam-se os resultados do cálculo realizado a partir dos referidos percentuais.

Buscou-se ainda determinar o sucateamento dos navios componentes da frota em 2015 ao longo dos 25 anos até 2040. Para tanto, considerou-se a idade dos navios da

¹⁹Note-se que, nos dados originais, incluem-se categorias como Handysize e Handymax, que correspondem a petroleiros de menor porte, não contemplados neste estudo. Os percentuais aplicados sobre o total de 1.956 navios são aqueles mostrados na figura 4.6, calculados considerando-se apenas as categorias Panamax, Aframax, Suezmax, VLCC e ULCC, estando esta última, conforme explicado anteriormente, agregada à categoria VLCC.

Tabela 4.14: Número de navios por categoria em 2015

<i>Categoria</i>	<i>Navios</i>
Panamax	325
Aframax	758
Suezmax	381
VLCC	492
Total	1956

frota de 2015 (figura 4.7) [111] e utilizou-se a curva de sobrevivência da figura 4.8 [35]. Chegou-se assim aos números da figura 4.9, que mostra a quantidade de navios de 2015²⁰ de cada categoria remanescente em cada ano. Note-se que as proporções da figura 4.6 foram mantidas no cálculo das embarcações remanescentes.

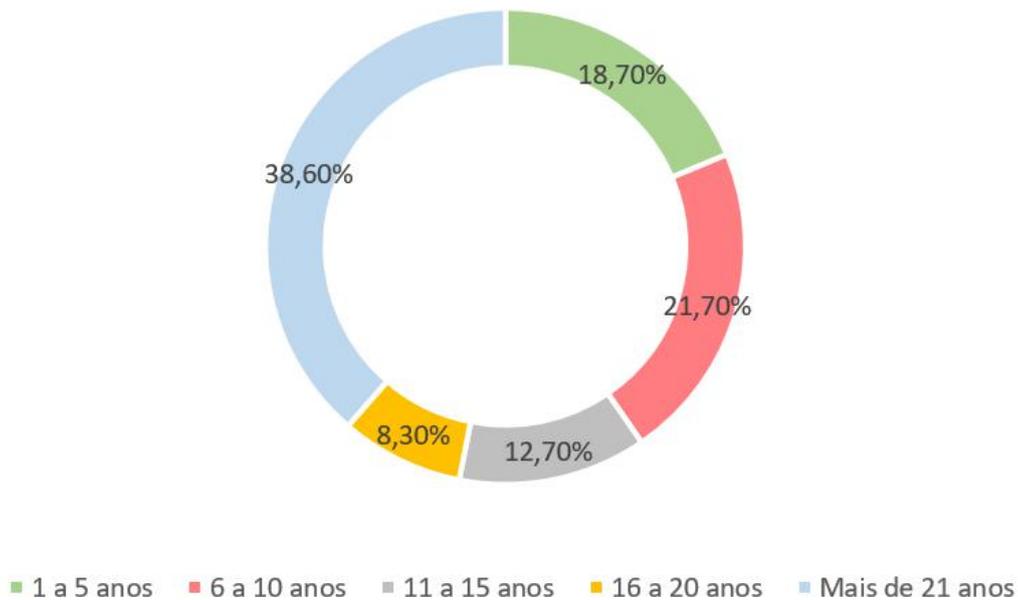


Figura 4.7: Perfil etário da frota de petroleiros em 2015
Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [111]

²⁰Por “navios de 2015”, entende-se navios que compunham a frota em 2015, mas que não necessariamente entraram em operação em 2015.

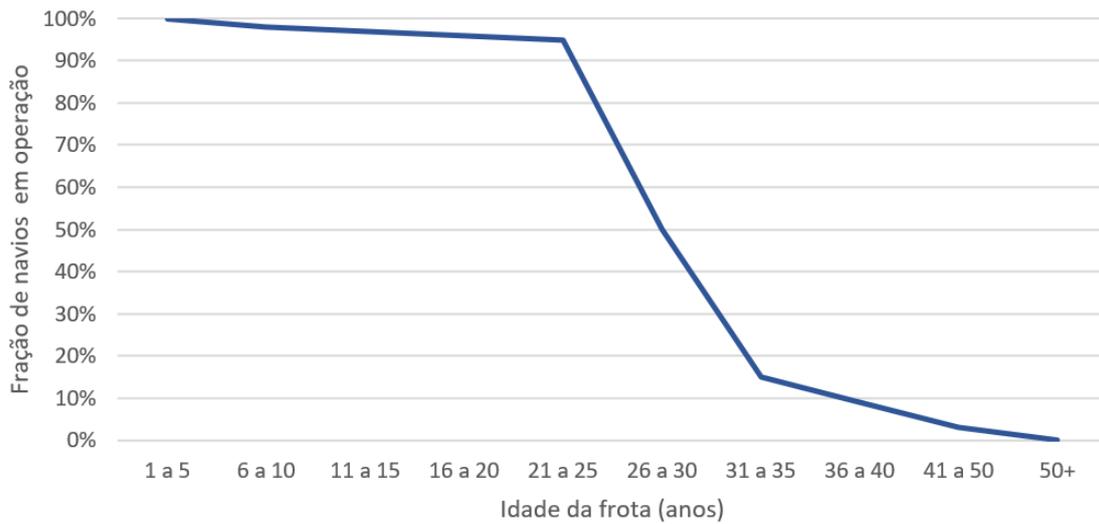


Figura 4.8: Curva de sobrevivência para navios petroleiros acima de 5.000 dwt
Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [35]

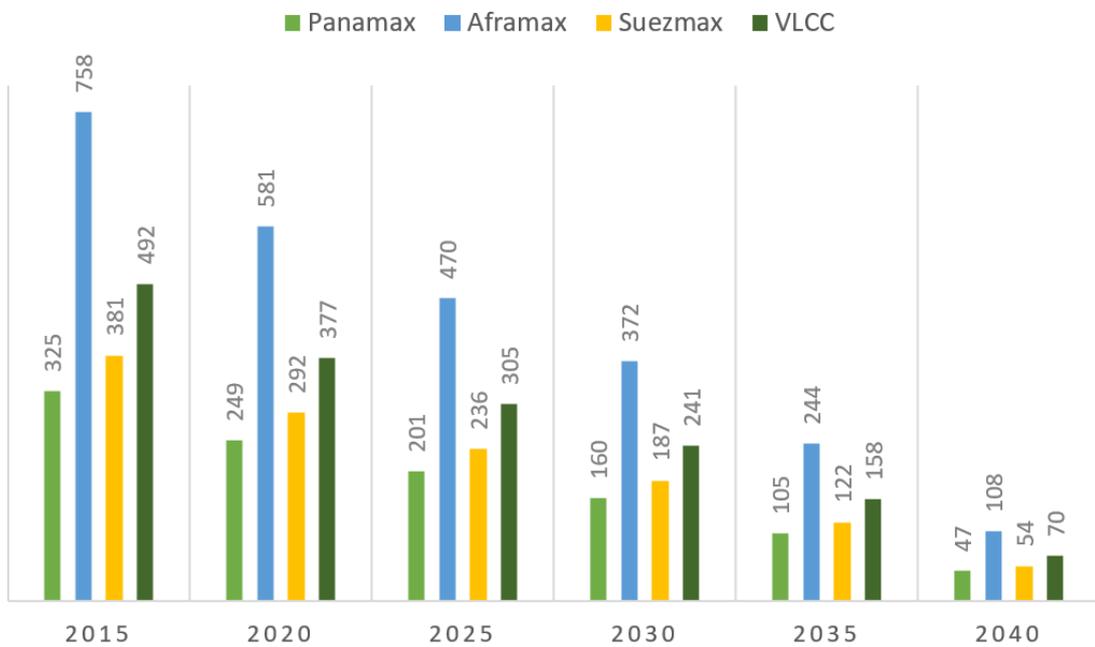


Figura 4.9: Sobrevivência dos navios existentes em 2015 ao longo dos anos
Fonte: Elaboração própria

4.3.2 Evolução do número total de navios

Para determinar o total de navios por ano, optou-se por projetar a evolução de cada frota separadamente, ou seja, assumiu-se que o número de embarcações de dada categoria depende exclusivamente do *trade* associado a rotas em que se empreguem navios desse tipo. Dessa forma, o número total de petroleiros no ano i é dado por

$$N_i = N_{Panamax}^{(i)} + N_{Aframax}^{(i)} + N_{Suezmax}^{(i)} + N_{VLCC}^{(i)}, \quad (4.2)$$

em que $N_\gamma^{(i)}$ representa o número total de navios da frota γ no ano i . Tal número foi calculado com base na equação 4.5.2,

$$N_\gamma^{(i)} = \left(\frac{T_\gamma^{(i)}}{T_\gamma^{(2015)}} \right) N_\gamma^{(2015)}, \quad (4.3)$$

em que $N_\gamma^{(2015)}$ é o número de petroleiros do tipo γ existentes em 2015, $T_\gamma^{(2015)}$ é o *trade* associado a rotas com petroleiros γ em 2015, $T_\gamma^{(i)}$ é o *trade* associado a rotas com petroleiros γ no ano i .

Considere-se o exemplo da frota de navios Suezmax em 2030. De acordo com os dados expostos na seção 4.1.2, a comercialização de petróleo via navios Suezmax atingiu 315 Mt em 2015, enquanto a projeção para o ano de 2030 é de 533 Mt. Nesse caso, da aplicação da equação 4.5.2 resulta uma frota de 644 navios (equação 4.4).

$$N_{Suezmax}^{(2030)} = \left(\frac{533 \text{ Mt}}{315 \text{ Mt}} \right) (381 \text{ navios}) = 644 \text{ navios}. \quad (4.4)$$

Conforme será detalhado na seção adiante, em cenários com mudança do perfil de velocidades, a equação 4.4 foi complementada com um coeficiente com o intuito de levar em conta o efeito do *slow steaming*.

4.3.3 Entrada de novos navios

Na subsecção 4.3.2, explicou-se o método utilizado para projetar a quantidade total de navios ao longo dos anos. Contudo, do ponto de vista da modelagem energética e sobretudo das emissões de CO₂, é fundamental conhecer a composição da frota em termos de ano de entrada em operação dos petroleiros. Em 2040, por exemplo, apenas uma pequena parcela dos navios ativos de 2015 ainda estará em circulação.

A frota γ no ano i é composta por navios de diferentes idades. Desse modo, é possível dizer que

$$N_{\gamma}^{(i)} = \sum_{j=2015}^{j=i} N_{\gamma}^{(i/j)}, \quad (4.5)$$

em que j representa o ano de entrada em operação do navio. Assim,

$$N_{\gamma}^{(i)} = N_{\gamma}^{(i/2015)} + N_{\gamma}^{(i/2016)} + \dots + N_{\gamma}^{(i/i-1)} + N_{\gamma}^{(i/i)}, \quad (4.6)$$

sendo $N_{\gamma}^{(i/2016)}$ o número de navios da frota γ do ano i que entraram em operação em 2016, $N_{\gamma}^{(i/2017)}$, o número de navios da frota γ do ano i que entraram em operação em 2017 e assim por diante. Note-se que o primeiro termo, $N_{\gamma}^{(i/2015)}$, não diz respeito apenas aos navios que entraram em operação em 2015, mas à totalidade da frota do referido ano. Visto que a análise baseou-se em intervalos de cinco anos, foi necessário agregar a equação 4.6 da seguinte forma:

$$N_{\gamma}^{(i)} = N_{\gamma}^{(i/2015)} + N_{\gamma}^{(i/2016-2020)} + \dots + N_{\gamma}^{[i/(i-9)-(i-5)]} + N_{\gamma}^{[i/(i-4)-(i)]}, \quad (4.7)$$

sendo $N_{\gamma}^{(i/2016-2020)}$ o número de navios da frota γ do ano i que entraram em operação entre 2016 e 2020 e assim por diante. Considere-se novamente o exemplo da frota Suezmax em 2030 (os respectivos totais são mostrados na tabela 4.15).

Tabela 4.15: Evolução da frota Suezmax no caso do exemplo proposto

<i>Frota</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>
Suezmax	381	462	550	644

Nesse caso, os totais seriam calculados conforme mostrado na tabela 4.16 (note-se que foi levado em consideração o sucateamento dos navios).

Com base nos números absolutos da tabela 4.16, é possível obter o percentual de navios construídos em cada período a cada ano da análise (tabela 4.17), informação essencial para o cálculo das emissões de CO₂ por rota.

Tabela 4.16: Cálculo do número de navios Suezmax de acordo com o ano de entrada em operação para o caso do exemplo proposto

<i>Período de entrada</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>
Até 2015	381	291	233	190
2016 - 2020	-	171	171	170
2021 - 2025	-	-	146	146
2025 - 2030	-	-	-	138

Tabela 4.17: Evolução da proporção de navios Suezmax de cada período no caso do exemplo proposto

<i>Período de entrada</i>	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>
Até 2015	100%	63 %	42%	30%
2016 - 2020	-	37 %	31%	26%
2021 - 2025	-	-	27%	23%
2025 - 2030	-	-	-	21%

4.3.4 Distribuição dos navios pelas rotas

Conforme explicado nas subseções 4.3.2 e 4.3.3, tratou-se a evolução das frotas Panamax, Aframax, Suezmax e VLCC separadamente. No entanto, foi preciso definir critérios para distribuir as embarcações de cada categoria pelas rotas estudadas. A informação da quantidade de navios em cada rota é irrelevante para o cálculo das emissões de motores principais (uma vez que estas dependem apenas do número total de viagens da rota), porém fundamental para o cálculo das emissões de motores auxiliares e caldeiras.

A fim de se estabelecer um critério para a alocação dos navios nas rotas, seguiu-se o seguinte raciocínio: considere-se uma rota fictícia A com distância d e *trade* anual igual a T_0 e uma rota fictícia B com distância $2d$ e *trade* anual igual a T_0 . É razoável admitir que o número de navios operando na rota B seja o dobro do número de navios operando na rota A. Da mesma forma, se as distâncias das rotas fossem iguais e se a rota A tivesse um *trade* igual ao dobro do da rota B, seria razoável admitir o inverso. Com base nessa lógica, o número de navios na rota k no ano i é dado por

$$n_k^{(i)} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_k^{(i)}}{T_\gamma^{(i)}} + \frac{d_k}{d_\gamma} \right) N_\gamma^{(i)}, \quad k \in \gamma, \quad (4.8)$$

em que $T_k^{(i)}$ representa o *trade* associado à rota k no ano i , $T_\gamma^{(i)}$, a soma dos *trades* das rotas associadas à frota γ , d_k , a distância da rota k , d_γ , a soma das distâncias das rotas vinculadas à frota γ e $N_\gamma^{(i)}$, o número total de navios da frota γ no ano i .

Considere-se, a título de exemplo, a rota 21 (Oriente Médio - China) em 2015 (170,4 Mt de petróleo comercializados). Sabendo-se que o *trade* total por meio de VLCCs em 2015 foi igual a 769 Mt e que, nesse mesmo ano, havia 496 embarcações dessa categoria em todo o mundo, é possível calcular $n_{21}^{(2015)}$ por meio da equação 4.8,

$$n_{21}^{(2015)} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{21}^{(2015)}}{T_{VLCC}^{(2015)}} + \frac{d_{21}}{d_{VLCC}} \right) N_{VLCC}^{(2015)}, \quad (4.9)$$

$$n_{21}^{(2015)} = \frac{1}{2} \left(\frac{170 \text{ Mt}}{769 \text{ Mt}} + \frac{6 \ 164 \text{ mn}}{74 \ 044 \text{ mn}} \right) (496 \text{ navios}) = 75 \text{ navios}. \quad (4.10)$$

4.4 Cenário de referência

De posse de uma projeção do *trade* de petróleo (seção 4.1), de rotas bem definidas (seção 4.2) e de um modelo de sucateamento e renovação da frota (seção 4.3), passou-se à elaboração de um cenário de referência para as emissões de CO₂ do transporte marítimo de petróleo.

Num primeiro momento (subseção 4.4.1), coletaram-se dados referentes às principais dimensões das quatro categorias de navios-tanque estudadas (Panamax, Aframax, Suezmax e VLCC), definindo-se, a partir de então, um “navio típico” por categoria. Tal levantamento foi complementado por algumas hipóteses de velocidade e carregamento (4.4.3 e 4.4.2).

De posse dessas entradas, passou-se à elaboração de um modelo simplificado de resistência ao avanço (subseção 4.4.4), por meio do qual se determinou a potência de reboque das referidas embarcações. Mais detalhes a respeito da teoria envolvida são explorados no anexo A.

Na subseção 4.4.6, explica-se como foi calculado o consumo de combustível, sendo este item separado em três partes:

- Motores principais
- Motores auxiliares
- Caldeiras

Finalmente, na subseção 4.4.7, apresentam-se as premissas utilizadas para contabilização das emissões de CO₂.

4.4.1 Caracterização das categorias de petroleiros

Conforme será explicado na subseção 4.4.4, os cenários de consumo de combustível e emissões de CO₂ que foram desenvolvidos neste trabalho basearam-se em um modelo simplificado de resistência ao avanço e propulsão. A utilização de tal modelo pressupõe o conhecimento de um certo número de parâmetros, cujo levantamento é explicado nesta subseção.

Principais dimensões de um navio

Em termos de geometria das embarcações, as principais grandezas lineares são (figura A.2) o comprimento na linha d'água (L), a boca moldada (B) e o calado (D). O comprimento na linha d'água é uma medida longitudinal do navio, enquanto a boca representa, *grosso modo*, a largura da embarcação. Já o calado é uma medida vertical: seu valor indica a que profundidade se encontra o ponto mais baixo da quilha [112][17]. Definições mais precisas são apresentadas no anexo A.

Outras grandezas importantes no contexto naval são o peso leve (LWT), o peso morto (DWT) e o deslocamento (∇). O peso leve corresponde à massa da embarcação em si, enquanto o peso morto diz respeito à massa variável que o navio carrega²¹. Já o deslocamento ∇ é a soma dessas duas grandezas, indicando portanto a massa de água²² deslocada pela embarcação em repouso [112][17].

Cabe finalmente conceituar o coeficiente de bloco C_B , principal fator de caracterização da forma do casco de uma embarcação. É definido pela expressão [17]

$$C_B = \frac{\nabla}{LBD}. \quad (4.11)$$



Figura 4.10: Principais dimensões de um navio
Fonte: Elaboração própria com base na figura de [17]

²¹ Assim, o porte é igual ao peso morto máximo que pode ser transportado por dada embarcação.

²² Embora corresponda à soma de LWT e DWT, o deslocamento é frequentemente expresso em termos volumétricos. A conversão é simples, bastando considerar-se a massa específica da água do mar [17].

Levantamento das dimensões lineares como função do porte

Embora possa haver embarcações de mesma capacidade com arquiteturas consideravelmente diferentes, as principais dimensões de um navio mercante podem ser estimadas com base em seu porte (peso morto máximo). A tabela 4.18 mostra as dimensões típicas de VLCCs de diferentes portes [35].

Tabela 4.18: Dimensões de VLCCs de diferentes portes

DWT_{max}	L_{pp} (m)	B (m)	$D_{projeto}$ (m)
260.000	320	58,0	17,7
280.000	320	58,0	19,0
300.000	320	58,0	20,4
319.000	320	60,0	21,0

Note-se que as diferenças entre os valores de L^{23} , B e D mostrados nessa tabela são relativamente pequenas (o mesmo ocorre no caso das categorias Panamax, Aframax e Suezmax). Assim, a seleção de apenas um valor de porte para representação da categoria como um todo não constitui uma simplificação exagerada. No contexto desta dissertação, procedeu-se exatamente dessa forma: considerou-se um “navio típico” por categoria²⁴, desprezando-se as ligeiras discrepâncias entre os expoentes de carga²⁵ das subcategorias.

A tabela 4.19 mostra o comprimento entre perpendiculares, a boca moldada e o calado de projeto²⁶ para os navios escolhidos como “típicos” [35].

Tabela 4.19: Definição dos navios típicos por categoria

<i>Categoria</i>	DWT_{max}	L_{pp} (m)	B (m)	$D_{projeto}$ (m)
Panamax	70.000	219	32,2	12,6
Aframax	105.000	233	42,0	13,4
Suezmax	150.000	264	48,0	14,8
VLCC	300.000	320	58,0	20,4

²³Note-se que os dados referem-se ao comprimento entre perpendiculares L_{pp} e não a L .

²⁴Procurou-se escolher um valor de porte intermediário entre aqueles contemplados por cada categoria. Para os VLCCs, por exemplo, escolheu-se 300.000 dwt.

²⁵Expoente de carga e porte bruto são sinônimos de porte.

²⁶Geralmente, o calado de projeto refere-se ao calado com o navio carregado.

Determinação do peso leve

A fim de se determinar o peso leve de cada navio da tabela 4.19, recorreu-se aos resultados de uma análise estatística [113] em que, por meio de técnicas de regressão, foram estabelecidas fórmulas relacionando o peso leve de uma embarcação a seu porte. No caso de navios-tanque, LWT pode ser estimado por meio da equação 4.12,

$$\frac{LWT}{L_{pp}BD} = 1,05 (a_1 + a_2 DWT), \quad (4.12)$$

sendo a_1 e a_2 coeficientes que variam de acordo com a categoria da embarcação. Na figura 4.11, mostra-se um exemplo da análise realizada (VLCCs). Os valores dos coeficientes a_1 e a_2 e os respectivos resultados são mostrados na tabela 4.20 [113].

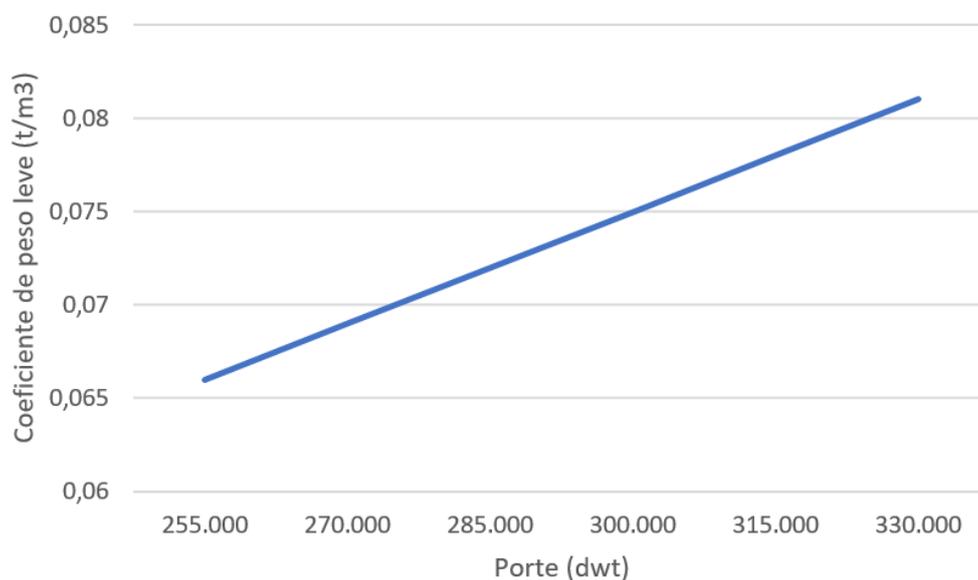


Figura 4.11: Coeficiente de peso leve como função do porte bruto, VLCCs

Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [113]

Tabela 4.20: Peso leve de cada navio de acordo com a análise estatística

Fonte: [113]

<i>Tipo</i>	$a_1 \cdot 10^2$	$a_2 \cdot 10^8$	<i>LWT (t)</i>	<i>DWT/LWT</i>
Panamax 70	9,24	8,40	10.260	6,82
Aframax 105	8,59	-2,35	12.602	8,33
Suezmax 150	13,0	-30,8	17.951	8,36
VLCC 300	1,91	18,2	31.597	9,49

4.4.2 Hipóteses de distinção das viagens

Devido à especificidade de sua carga, um navio-tanque normalmente está carregado apenas durante metade do tempo em curso: após uma viagem com carga, o navio entrega o petróleo em um porto em que a *commodity* é importada para, em seguida, fazer o caminho de volta vazio [114].

Durante a viagem de volta, em geral, faz-se uso dos tanques de lastro, cuja função é conferir estabilidade à embarcação, aumentando seu peso morto com a própria água do mar [115].

A diferença entre essas duas condições de carga é significativa e, assim, optou-se por representá-la no modelo, estabelecendo-se a distinção entre viagens de ida e de volta²⁷.

Viagem de ida (*laden voyage*)

No caso da viagem com carga, considerou-se uma operação de acordo com as condições de projeto, isto é,

- navio a plena carga ($DWT = DWT_{max}$);
- comprimento na linha d'água igual a 103% do comprimento entre perpendiculares ($L = 1,03 L_{pp}$) [17];
- calado de projeto ($D = D_{projeto}$).

Viagem de volta (*ballast voyage*)

No caso da viagem de volta, assumiram-se as seguintes hipóteses:

- navio em lastro, com peso morto total igual à metade do máximo ($DWT = 0,5 DWT_{max}$) [116];
- comprimento na linha d'água igual a 60% daquele referente à condição em plena carga [117], *i.e.*, 62% do comprimento entre perpendiculares ($L = 0,62 L_{pp}$);
- calado calculado a partir da equação 4.11, considerando-se o coeficiente de bloco constante ($D = \frac{\nabla}{LBC_B}$).

²⁷Note-se que a terminologia utilizada é apenas uma convenção: arbitrou-se a viagem com carga como “ida” e a viagem em lastro como “volta”.

4.4.3 Velocidade

Em relação às velocidades praticadas pelos petroleiros, adotou-se uma hipótese mais simples: apesar de existirem dados indicando perfis de velocidades distintos nas condições de carga e lastro, tal diferença é bastante discreta [118]. Assim, no cenário de referência, trabalhou-se com uma velocidade única ao longo de todo o percurso. Resta, no entanto, determinar o valor dessa velocidade.

Na figura 4.12, mostra-se a média das razões entre velocidade real e velocidade de projeto de navios petroleiros em dois anos distintos [26]. A clara diferença entre os dois perfis deve-se a uma questão de conjuntura econômica: até 2007, com a economia mundial a pleno vapor, a preocupação com o consumo de combustível era mínima frente às grandes margens geradas pelo comércio internacional de *commodities*. Já em 2012, com preços de bunker relativamente altos e taxas de frete não tão interessantes, o *slow steaming* tornou-se economicamente atrativo, o que justifica o *gap* retratado no gráfico.

No cenário de referência, tendo em vista os baixos preços de bunker atualmente praticados e a perspectiva de crescimento do mercado internacional de petróleo, optou-se por considerar o perfil de velocidades igual àquele de 2007.

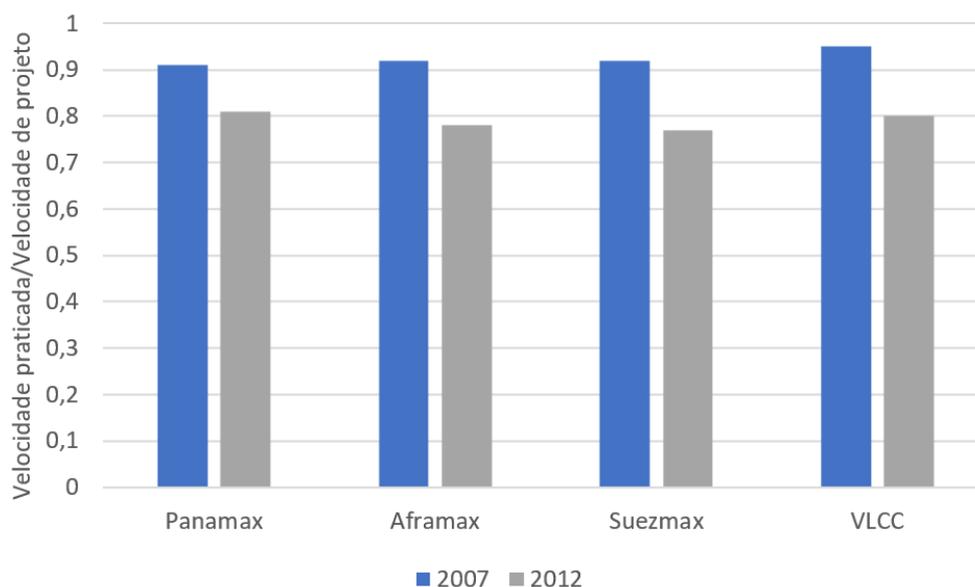


Figura 4.12: Relação entre velocidade praticada e velocidade de projeto

Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [26]

A velocidade de projeto é igual a 15,0 nós para navios Panamax, Aframax e Suezmax e 16,0 nós para navios VLCC [35].

4.4.4 Resistência ao avanço e propulsão

De posse das informações cujo levantamento foi exposto na subseção 4.4.1 e levando-se em conta as hipóteses apresentadas na seção 4.4.2, passou-se à etapa de elaboração de um modelo de resistência ao avanço e propulsão.

Resistência ao avanço

A fim de estimar a potência efetiva de reboque P_E , recorreu-se a um modelo simplificado de resistência ao avanço [119], de acordo com o qual a potência efetiva pode ser decomposta em três parcelas:

$$P_E = P_F + P_W + P_A, \quad (4.13)$$

sendo P_F a potência associada à resistência friccional (ou seja, a resistência em águas calmas), P_W , a potência correspondente à resistência das ondas e P_A , a potência associada à resistência do ar (mais detalhes a respeito do cálculo da resistência ao avanço de uma embarcação são explorados no anexo A).

Resistência friccional No caso de grandes navios mercantes, a parcela friccional é aquela que mais contribui para a resistência ao avanço total [17]. É calculada por meio da equação 4.14,

$$P_F = \frac{\rho C_F S v^3}{2}, \quad (4.14)$$

em que ρ é a massa específica da água do mar (1029 kg/m^3 [120]), C_F , o coeficiente de resistência friccional, S , a superfície molhada do casco e v , a velocidade da embarcação. O coeficiente de resistência friccional é dado pela equação 4.15 [121],

$$C_F = \frac{0,075}{(\log \text{Re} - 2)^2}, \quad (4.15)$$

em que Re é o número de Reynolds do escoamento, dado por

$$\text{Re} = \frac{v L_{WL}}{\nu}, \quad (4.16)$$

em que L_{WL} é o comprimento na linha d'água (por hipótese, igual a 103 % do comprimento entre perpendiculares L_{pp} [17]) e ν , a viscosidade cinemática da água do mar ($1,14 \text{ mm}^2/\text{s}$ [122]).

Geralmente, a superfície molhada é determinada com o auxílio de programas computacionais para cálculos hidrostáticos. No entanto, para uma estimativa rápida e relativamente acurada desse valor, existem algumas equações simples, tais como a fórmula de Mumford [123],

$$S = 1,025 \left(\frac{\nabla}{D} + 1,7 L_{WL} D \right). \quad (4.17)$$

No âmbito deste trabalho, utilizou-se uma adaptação da equação de Mumford específica para graneleiros e navios-tanque (equação 4.18) [123].

$$S = 0,99 \left(\frac{\nabla}{D} + 1,9 L_{WL} D \right) \quad (4.18)$$

Resistência de ondas Conforme explicado anteriormente, P_F corresponde à potência que o casco deve vencer para que o navio se locomova a uma dada velocidade v em águas completamente calmas. Na prática, somam-se à resistência friccional outras resistências de diversas naturezas (detalhes no anexo A), as quais representamos, no presente caso, por meio da potência de ondas P_W e da potência do ar P_A . Ao contrário do que ocorre com a potência friccional, os valores de P_W e P_A dependem do fator climático: a resistência adicional é muito mais significativa numa tempestade do que numa condição amena [17]. Dada a complexidade do assunto e a dificuldade de determinar condições climáticas típicas de acordo com cada rota e tendo em vista o caráter global da modelagem, optou-se por dividir o percurso de todas as rotas de acordo com a seguinte lógica [124]:

- durante 70% do tempo, os navios percorrem águas calmas, ou seja, há ausência de ondas e a resistência do ar é devida apenas ao movimento do navio;
- durante 30% do tempo, os navios enfrentam mau tempo, representado por ondas²⁸ de 4,0 m e vento de proa de 14,0 m/s.

Dessa forma, para cada embarcação, P_W e P_A assumem, cada qual, dois valores diferentes, um para o trecho calmo e outro para o trecho com condições mais severas.

A potência de ondas é calculada por meio da equação 4.19,

$$P_W = \frac{\rho g C_W \left(\frac{H_{1/3}}{2} \right)^2 B_{WL}^2 \omega}{L_{WL}} (v + u), \quad (4.19)$$

em que ρ é a massa específica da água do mar, g , a aceleração da gravidade, C_W , o coeficiente de ondas, $H_{1/3}$, a altura significativa de ondas (*significant wave height*, SWH²⁹), B , a boca na linha d'água, ω , a frequência angular das ondas e u , a velocidade das ondas com relação ao navio, dada por

²⁸Altura significativa de ondas.

²⁹Em engenharia oceânica e oceanografia, a altura significativa de ondas, igual à média da altura do terço superior das maiores ondas individuais presentes, é tradicionalmente utilizada como parâmetro representativo de um certo estado de mar [125].

$$u = v + \frac{\omega}{k} \cos \beta, \quad (4.20)$$

em que k é o número de onda ($k = 2\pi/\lambda$) e β é um ângulo definido de tal forma que $\beta = 0$ corresponda a ondas de proa. Assumiram-se os seguintes valores para o comprimento de onda e para o período [126]:

- $\lambda = 40$ m
- $T = 20$ s

Resistência do ar A expressão da potência correspondente à resistência do ar é

$$P_A = \frac{\rho_A C_A S_A (v + u_A)^2}{2} v, \quad (4.21)$$

em que ρ_A é a massa específica do ar ($\rho_A = 1,225 \text{ kg/m}^3$ [127]), C_A , o coeficiente de resistência aerodinâmica (por hipótese, igual a 0,9 [17]), S_A a área da superfície do navio contra a qual o vento sopra e u_A , a velocidade do vento (conforme mencionado anteriormente, $u_A = 0$ na condição de águas calmas e $u_A = 14 \text{ m/s}$ na condição de mau tempo).

Cabe ainda explicar o método utilizado para estimação do valor de S_A . A área S_A corresponde à superfície do navio acima da linha d'água submetida à pressão dinâmica do vento. Conforme explicado, considera-se vento frontal e assim, S_A é aproximadamente igual à área vermelha da figura A.3. Dado que a altura da linha d'água até o topo da embarcação é da mesma ordem de grandeza do calado, optou-se por estimar tal área por meio da multiplicação de B por D .

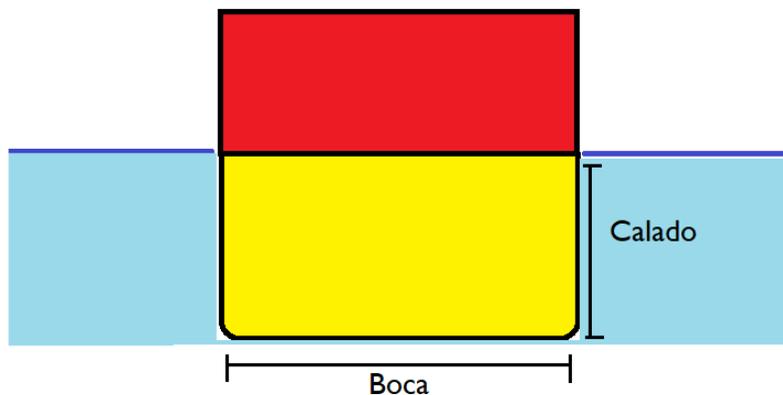


Figura 4.13: Parte aérea e parte submersa da seção transversal de um navio
Fonte: Elaboração própria com base na figura de [17]

Propulsão

Conforme explicado anteriormente, o *output* do modelo de resistência ao avanço é uma potência de reboque, ou seja, uma potência efetiva P_E . Naturalmente, tendo em vista as perdas mecânicas do sistema propulsivo, a potência P_B efetivamente demandada pelo motor é sempre superior a P_E [17]. Assim, pode-se dizer que

$$P_B = \frac{P_E}{\eta_T}, \quad (4.22)$$

sendo η_T a eficiência total do sistema propulsivo, que pode ser decomposta em diversos fatores (equação 4.23).

$$\eta_T = \eta_H \eta_0 \eta_R \eta_S \quad (4.23)$$

Na equação 4.23, η_H representa a eficiência de casco, η_0 , a eficiência em águas abertas, η_R , a eficiência rotativa relativa e η_S , a eficiência do eixo, cujos significados são abordados no anexo A. A eficiência de casco é dada pelo quociente

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w}, \quad (4.24)$$

em que w é o coeficiente de esteira e t , o coeficiente de redução da força propulsora.

Na prática, o cálculo do valor de η_T é complexo, uma vez que a eficiência varia de acordo com a velocidade e com as condições de navegação [17]. Contudo, no contexto deste estudo, por meio do qual não se pretende analisar um navio em particular, mas a frota mundial de petroleiros, supôs-se que o uso de valores típicos bastaria para atingir razoável acurácia.

O coeficiente de esteira foi estimado a partir da equação [128]

$$w = -0,05 + 0,50 C_B, \quad (4.25)$$

em que C_B é o coeficiente de bloco. O coeficiente de redução da força propulsora foi estimado por meio da equação [129]

$$t = 0,60 w, \quad (4.26)$$

ou seja, como uma fração do próprio coeficiente de esteira. As eficiências η_R e η_S variam dentro de faixas bastante restritas e, assim, foram consideradas constantes ($\eta_R = 1,03$ e $\eta_S = 0,99$) [17].

A eficiência em águas abertas η_0 foi determinada com base na figura 4.14, considerando-se a faixa “navios-tanque de grande porte”.

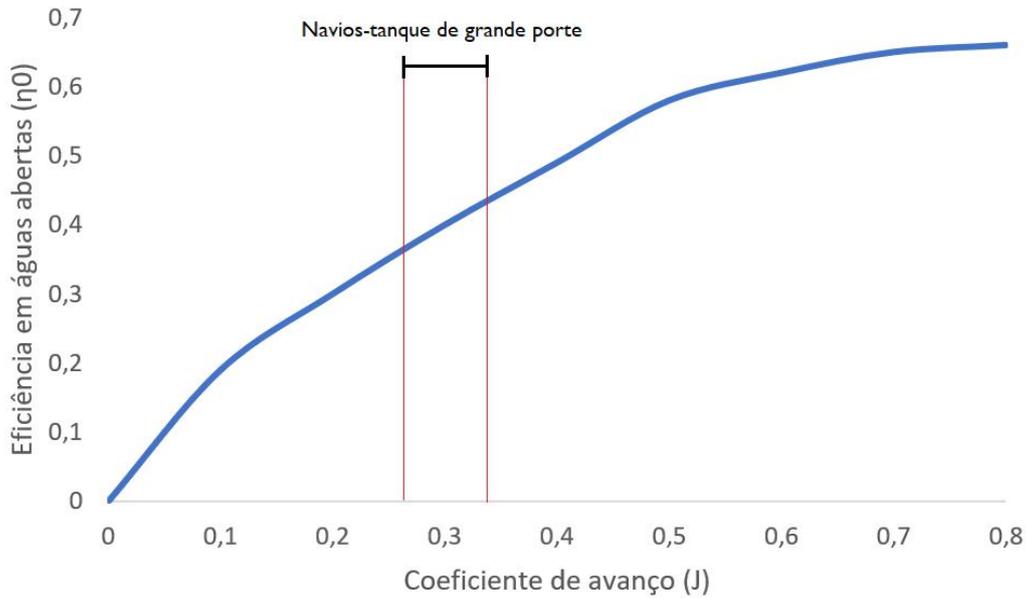


Figura 4.14: Eficiência de águas abertas como função do coeficiente de avanço

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [17]

Na tabela 4.21, mostram-se os resultados da modelagem de resistência ao avanço e propulsão para cada categoria de navio, de acordo com as condições de carga e de clima.

Tabela 4.21: Resultados da modelagem energética

	<i>Viagem de ida (com carga)</i>			<i>Viagem de volta (em lastro)</i>		
	<i>D(m)</i>	<i>∇(m³)</i>	<i>P_E/P_B(MW)</i>	<i>D(m)</i>	<i>∇(m³)</i>	<i>P_E/P_B(MW)</i>
<i>Águas calmas</i>						
Panamax	14,1	77.998	3,16/6,77	13,3	43.984	2,48/5,31
Aframax	14,7	114.288	3,72/9,18	13,6	63.267	2,82/6,95
Suezmax	16,1	163.218	4,75/11,6	13,9	90.331	3,58/8,72
VLCC	22,0	341.688	8,74/24,5	20,0	186.197	6,58/18,5
<i>Mau tempo</i>						
Panamax	14,1	77.998	3,86/8,27	13,3	43.984	3,18/6,80
Aframax	14,7	114.288	4,68/11,6	13,6	63.267	3,78/9,33
Suezmax	16,1	163.218	5,92/14,4	13,9	90.331	4,75/11,6
VLCC	22,0	341.688	10,8/30,4	20,0	186.197	8,68/24,4

4.4.5 Validação

A fim de validar os resultados mostrados na tabela 4.21, recorreu-se a dados de *Specified Maximum Continuous Rating* (SMCR) das diversas categorias de navios. Tal grandeza é definida como a máxima potência que pode ser extraída do motor principal, considerando-se uma operação segura e contínua [130].

Na figura 4.15, comparam-se valores máximo e mínimo de SMCR de cada categoria [35] aos valores de potência encontrados na subseção 4.4.4. Verifica-se que, de fato, as potências calculadas são coerentes, pois se encontram, em geral, abaixo dos valores de SMCR.

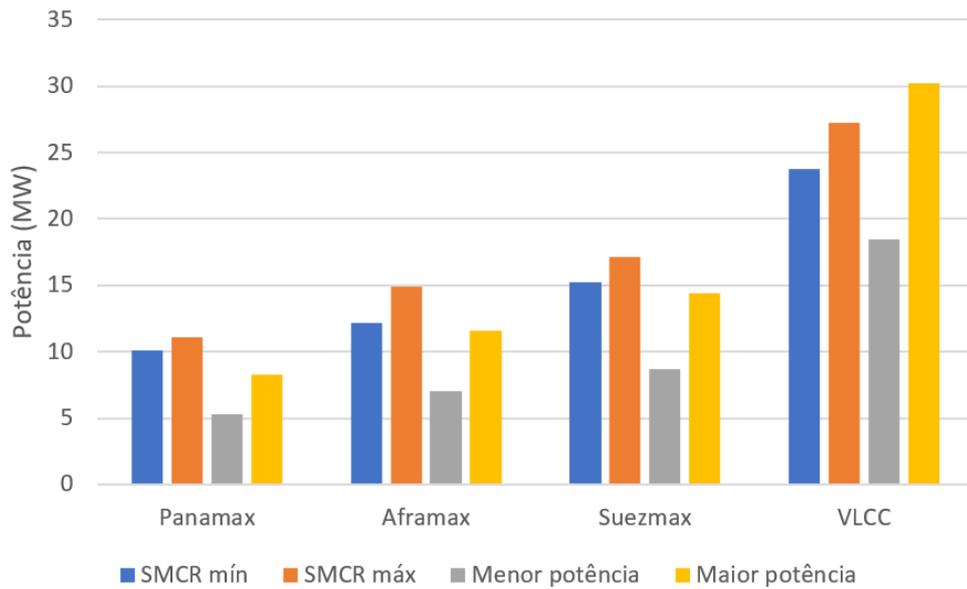


Figura 4.15: Validação das potências encontradas por comparação com SMCR
Fonte: Elaboração própria com base em dados de [35]

4.4.6 Consumo de combustível

Nesta subseção, explica-se como foi calculado o consumo de bunker em motores principais a partir das saídas do modelo de resistência e propulsão. Aborda-se também a metodologia utilizada para a determinação do consumo de combustível em motores auxiliares e em caldeiras.

Motores principais

No caso dos motores principais, associados à movimentação dos navios, o cálculo da demanda por combustível relaciona-se diretamente aos resultados da subseção 4.4.4. Conforme indica a figura 4.16, o consumo de bunker deve ser calculado a partir da potência de freio P_B , considerando-se a eficiência energética do próprio motor.

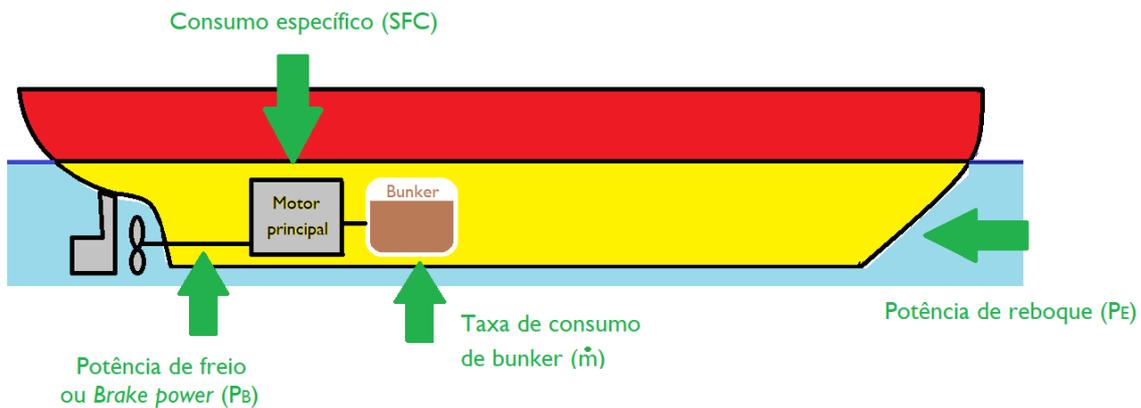


Figura 4.16: Potência de freio e consumo específico

Fonte: Elaboração própria

Para tanto, geralmente se utiliza o consumo específico (SFOC, do inglês *Specific Fuel Oil Consumption*), que representa a razão entre taxa de consumo de HFO e potência desenvolvida na saída do motor [131]. Assim, o consumo de bunker pelo sistema propulsivo de uma embarcação navegando durante um período Δt com carga de motor principal igual a P_B é dado por

$$m = \text{SFOC} \cdot P_B \cdot \Delta t \quad (4.27)$$

Estima-se que o SFC médio de motores principais de navios construídos entre 1999 e 2009 seja igual a 190 g/kWh [26] e, por isso, tal valor foi escolhido como referência para o consumo específico da frota de petroleiros existente em 2015.

No entanto, diante da obrigatoriedade de *compliance* com o EEDI imposta pela IMO a partir de 2013, espera-se que ocorra uma gradual redução do consumo específico médio dos navios entrando em operação (alguns estudos apontam inclusive que o SFC de embarcações mais modernas situa-se na faixa entre 165 e 185 g/kWh [132][48]).

Portanto, no cenário de referência deste estudo, em vez de se congelar o consumo específico de novos navios entre 2015 e 2040, optou-se por diminuí-lo de acordo com os fatores de redução estipulados pela IMO (tabela 4.22 [43]), conforme indica a equação 4.42,

$$\text{SFOC}_i = (1 - x_i) \text{SFOC}_{2015}, \quad (4.28)$$

em que SFOC_i é o consumo específico do período i , x_i , o fator de redução das emissões requisitado pela IMO para o período i e SFOC_{2015} , o consumo específico de referência de 2015 (190 g/kWh [26]). Note-se que o fator de redução se aplica somente a navios novos.

Tabela 4.22: Fatores de redução do EEDI requisitados pela IMO (navios-tanque)

<i>Fase 0</i>	<i>Fase 1</i>	<i>Fase 2</i>	<i>Fase 3</i>
2013-2014	2015-2019	2020-2024	2025 em diante
0%	10%	20%	30%

Note-se ainda que a aplicação direta dos fatores de redução do EEDI ao consumo específico constitui uma simplificação: o índice baseia-se em uma medida de CO₂ emitido por tonelada-quilômetro. Essas emissões, no entanto, podem ser provenientes tanto do bunker queimado em motores principais como do diesel marítimo usado em motores auxiliares (emissões de caldeiras não são levadas em conta pelo índice [43]).

Considerando-se que, com o navio em curso (modo operacional que é levado em conta no EEDI), em média, 90% do CO₂ emitido advém do motor principal e tendo em vista os fatores de emissão extremamente similares do HFO e do MGO, é razoável admitir que a redução requerida pela IMO seja representada por um decréscimo percentual equivalente do SFOC do motor principal e do SFC³⁰ dos motores auxiliares (conforme detalharemos à frente, também foram aplicados os fatores de redução da tabela 4.22 aos motores auxiliares.).

³⁰Note-se que, no caso de motores auxiliares, é preferível a terminologia SFC (*Specific Fuel Consumption*), pois o combustível utilizado é o diesel marítimo, o que invalida a expressão “*Fuel Oil*”.

Motores auxiliares

O consumo de combustível em motores auxiliares varia amplamente em função da potência nominal, da demanda por potência auxiliar do navio (que varia de acordo o modo de operação) e do ano de construção do equipamento [26].

Além disso, informações a respeito das características técnicas e operacionais dos motores auxiliares frequentemente estão incompletas nas bases de dados disponíveis, sobretudo no caso de navios mais antigos [26].

Portanto, nesta dissertação, abordou-se o problema do consumo de motores auxiliares de maneira análoga à exposta no Relatório de Gases de Efeito Estufa da IMO [26], em que foram definidos perfis operacionais típicos para cada categoria de petroleiro com base em uma pesquisa conduzida pela consultoria Starcrest em diversos portos da América do Norte [133]. Os números são mostrados na tabela 4.23.

Tabela 4.23: Potência auxiliar demandada de acordo com modo operacional

<i>Tipo de petroleiro</i>	<i>Carga típica de motores auxiliares (kW)</i>			
	<i>Atracado</i>	<i>Ancorado</i>	<i>Manobrando</i>	<i>Em curso</i>
Panamax	750	750	1.125	750
Aframax	1.000	1.000	1.500	1.000
Suezmax	1.250	1.250	1.875	1.250
VLCC	1.500	1.500	2.250	1.500

A seguir, explicam-se os termos empregados na tabela 4.23 [133]:

- Atracado (*at-berth*): quando o navio se encontra no berço de atracação, inclusive enquanto está sendo carregado ou descarregado.
- Ancorado (*at-anchor*): quando o navio se encontra ancorado dentro ou próximo ao quebra-mar, aguardando uma vaga no berço de atracação, manutenção ou nova viagem.
- Manobrando (*manoeuvring*): refere-se a todos os movimentos do navio no interior do quebra-mar.
- Em curso (*at-sea/transit mode*): refere-se à operação do navio em águas abertas, isto é, além do quebra-mar.

De posse das cargas auxiliares mostradas na tabela 4.23, para se calcular a quantidade de energia requisitada pelos sistemas auxiliares ao longo de um ano, resta determinar o tempo que as embarcações passam em cada condição operacional.

Para tanto, o primeiro passo é a determinação do tempo em curso, resultado indireto da metodologia de cálculo do consumo de combustível do motor principal (considerando-se também a distribuição dos navios pelas rotas, conforme explicado na subseção 4.3.4). O tempo total em curso de um navio ao longo do ano é dado por

$$\Delta t_{curso} = \frac{n_v}{n_k} \Delta t_1, \quad (4.29)$$

em que Δt_1 é o tempo de uma viagem, n_k , o número de navios na rota k e n_v , o número total de viagens da rota k .

Determinar o tempo que os navios passam nas demais condições operacionais (atracado, ancorado, manobrando) é uma tarefa mais complicada: a quantidade de horas que uma embarcação espera até ser solicitada para uma nova viagem, por exemplo, varia amplamente e é relativamente imprevisível [134].

Neste trabalho, optou-se por estimar os tempos ancorado e atracado com base em um inventário de emissões do porto de Long Beach [134], no qual se apresentam valores médios para esses tempos de acordo com as categorias de navios petroleiros (tabela 4.24). Note-se que uma viagem (uma ida e uma volta) inclui dois períodos de atracamento e dois períodos de ancoragem.

Tabela 4.24: Tempo atracado e tempo ancorado

<i>Categoria</i>	<i>Atracado (h)</i>	<i>Ancorado (h)</i>
Panamax	43,3	62,4
Aframax	65,7	86,8
Suezmax	26,4	59,8
VLCC	24,7	88,5

Considerando-se o resultado da equação e os dados da tabela 4.24, têm-se, para qualquer rota, os valores de Δt_{curso} , $\Delta t_{atracado}$ e $\Delta t_{ancorado}$, ou seja, o tempo gasto por um navio em cada uma das condições operacionais. Falta apenas determinar o tempo em manobra, que corresponde a todo o tempo restante do ano em questão, isto é,

$$\Delta t_{manobrando} = 8760 \text{ h} - (\Delta t_{curso} + \Delta t_{atracado} + \Delta t_{ancorado}) \quad (4.30)$$

A título de exemplo, mostram-se os cálculos referentes a um navio da rota 4 (Caribe - Estados Unidos) a seguir. De acordo com a metodologia da subseção 4.3.4, um navio Panamax dessa rota faz, ao longo de 2015, 16 viagens. Assim,

$$\Delta t_{curso} = 16 \times 2 \times \underbrace{\frac{3.313 \text{ km}}{25 \text{ km/h}}}_{\Delta t_1} = 4.240 \text{ h} \quad (4.31)$$

$$\Delta t_{atracado} = 16 \times 2 \times 43,3 \text{ h} = 1.385 \text{ h} \quad (4.32)$$

$$\Delta t_{ancorado} = 16 \times 2 \times 62,4 \text{ h} = 1.997 \text{ h} \quad (4.33)$$

$$\Delta t_{manobrando} = 8.760 \text{ h} - (4.240 \text{ h} + 1.385 \text{ h} + 1.997 \text{ h}) = 1.138 \text{ h} \quad (4.34)$$

A energia total consumida por motores auxiliares ao longo de um ano é dada então por

$$E_{aux} = E_{curso} + E_{atracado} + E_{ancorado} + E_{manobrando}, \quad (4.35)$$

sendo $E_{curso} = P_{curso} \Delta t_{curso}$ (ou seja, o produto da potência auxiliar típica com o navio em curso pelo número total de horas em curso ao longo do ano), $E_{atracado} = P_{atracado} \Delta t_{atracado}$ e assim por diante. No caso do exemplo proposto, tem-se

$$E_{curso} = 750 \text{ kW} \times 4.240 \text{ h} = 3.180 \text{ MWh} \quad (4.36)$$

$$E_{atracado} = 750 \text{ kW} \times 1.385 \text{ h} = 1.039 \text{ MWh} \quad (4.37)$$

$$E_{ancorado} = 750 \text{ kW} \times 1.997 \text{ h} = 1.498 \text{ MWh} \quad (4.38)$$

$$E_{manobrando} = 1.125 \text{ kW} \times 1.138 \text{ h} = 1.280 \text{ MWh} \quad (4.39)$$

$$E_{aux} = 3.180 \text{ MWh} + 1.039 \text{ MWh} + 1.498 \text{ MWh} + 1.280 \text{ MWh} = 6.997 \text{ MWh} \quad (4.40)$$

A fim de se converter a demanda por energia em motores auxiliares em consumo de combustível, deve-se recorrer, novamente, ao conceito de consumo específico. Conforme explicado anteriormente, os combustíveis utilizados em motores principais e em motores auxiliares são diferentes [21]. De modo geral, sistemas auxiliares utilizam diesel marítimo (MGO). Dessa forma,

$$m = \text{SFC}_{aux} \cdot E_{aux}. \quad (4.41)$$

Em novos navios, o consumo específico SFC_{aux} também foi reduzido de acordo com os fatores da tabela 4.22, tomando por base o valor de 215 g/kWh [135]. Assim,

$$\text{SFC}_{aux_i} = (1 - x_i) \text{SFC}_{aux_{2015}}, \quad (4.42)$$

O navio do exemplo da rota 4 consome, em 2015,

$$215 \text{ g/kWh} \times 6.997 \text{ MWh} = 1.504 \text{ toneladas de diesel marítimo}. \quad (4.43)$$

Caldeiras

A metodologia empregada para o cálculo do consumo em caldeiras é idêntica àquela apresentada para motores auxiliares, exceto pelo fato de o combustível envolvido ser o óleo combustível (no caso, o próprio bunker). O perfil de operação de caldeiras em petroleiros é mostrado na tabela 4.25.

Tabela 4.25: Perfil de operação da caldeira de acordo com o tipo de petroleiro

<i>Tipo de petroleiro</i>	<i>Carga típica da caldeira (kW)</i>			
	<i>Atracado</i>	<i>Ancorado</i>	<i>Manobrando</i>	<i>Em curso</i>
Panamax	1.500	300	300	150
Aframax	2.000	400	400	200
Suezmax	2.500	500	500	250
VLCC	3.000	600	600	300

Note-se que o valor de consumo específico foi considerado constante³¹, igual a 305 g/kWh [26].

³¹Pelo fato de as emissões das caldeiras não serem levadas em conta no cálculo do EEDI.

4.4.7 Emissões de CO₂

Para uma análise completa das emissões de gases de efeito estufa, dever-se-ia, *a priori*, levar em conta o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). No entanto, conforme discutido anteriormente, no contexto do transporte marítimo, as contribuições do CH₄ e do N₂O para as emissões de GEE são muito modestas em comparação com a do CO₂ (aproximadamente 2% em base CO₂eq) [26], de modo que, neste trabalho, estudaram-se apenas as emissões de gás carbônico.

As emissões de CO₂ foram calculadas com base na equação 4.44,

$$m_{CO_2} = (FE)_{comb} m_{comb}, \quad (4.44)$$

sendo m_{comb} a massa e $(FE)_{comb}$ o fator de emissão do combustível em questão. Os fatores de emissão do bunker e do diesel marítimo são mostrados na tabela 4.26 [26].

Tabela 4.26: Fatores de emissão (g CO₂/g combustível)

<i>Combustível</i>	<i>Fator de emissão</i>
Bunker	3,114
Diesel marítimo	3,206

4.5 Cenários alternativos

Nesta seção, descrevem-se as particularidades dos cenários alternativos, cada qual elaborado a partir do cenário de referência, modificando-se ora apenas alguns parâmetros, ora a dinâmica do modelo como um todo, considerando-se, por exemplo, mudanças tecnológicas.

4.5.1 Cenário 2 (contrafactual)

No cenário contrafactual, a estrutura metodológica do cenário 1, bem como as premissas de evolução da frota e o regime de velocidades, foi inteiramente preservada. O cenário 2 distingue-se do cenário de referência por ter como hipótese a desconsideração dos ganhos de eficiência esperados pela obrigatoriedade de observância dos requisitos do EEDI, ou seja, trata-se de um cenário de eficiência congelada (figura 4.17).

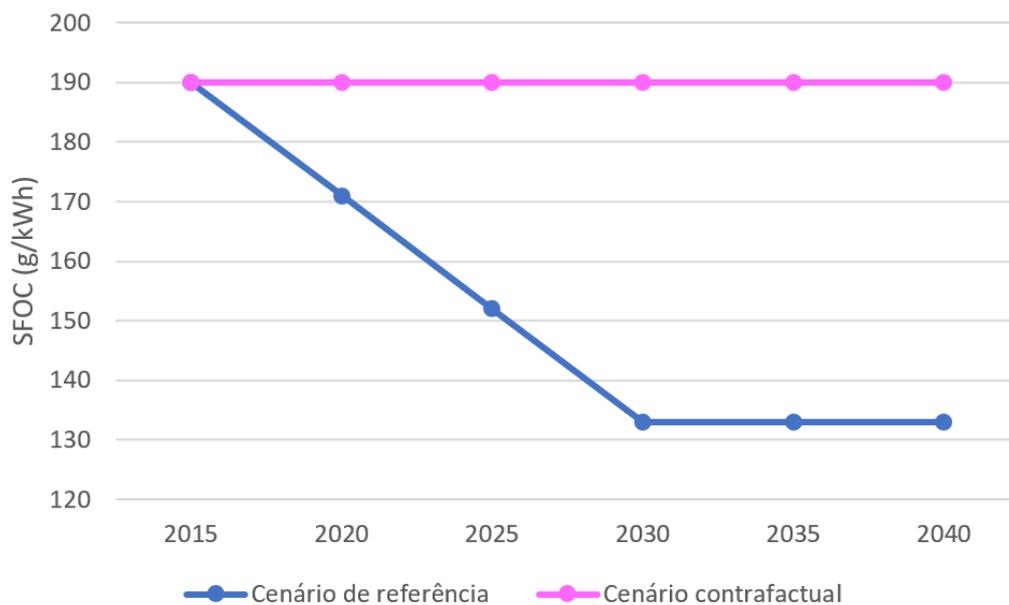


Figura 4.17: Consumo específico de novos navios - cenário contrafactual

Fonte: Elaboração própria

Desconsidera-se também o ganho de eficiência em motores auxiliares, cujo consumo específico de MGO permanece em 215 g/kWh entre 2015 e 2040. O tratamento dado às caldeiras é idêntico ao do cenário de referência (manutenção de um consumo específico de HFO de 305 g/kWh ao longo de todo o período).

4.5.2 Cenário 3 (*slow steaming*)

Por meio do cenário 3, procura-se avaliar o potencial de mitigação associado à navegação em velocidades mais baixas (*slow steaming*). Trata-se, portanto, de um cenário de mitigação incremental, em que a composição do cenário-base é integralmente mantida³², assim como o paradigma energético do setor (não ocorrem mudanças de combustível).

Na figura 4.18 mostra-se como o *slow steaming* foi incorporado ao modelo: a partir de 2020, considerou-se uma redução de aproximadamente 17% na velocidade praticada por petroleiros de todas as categorias³³.

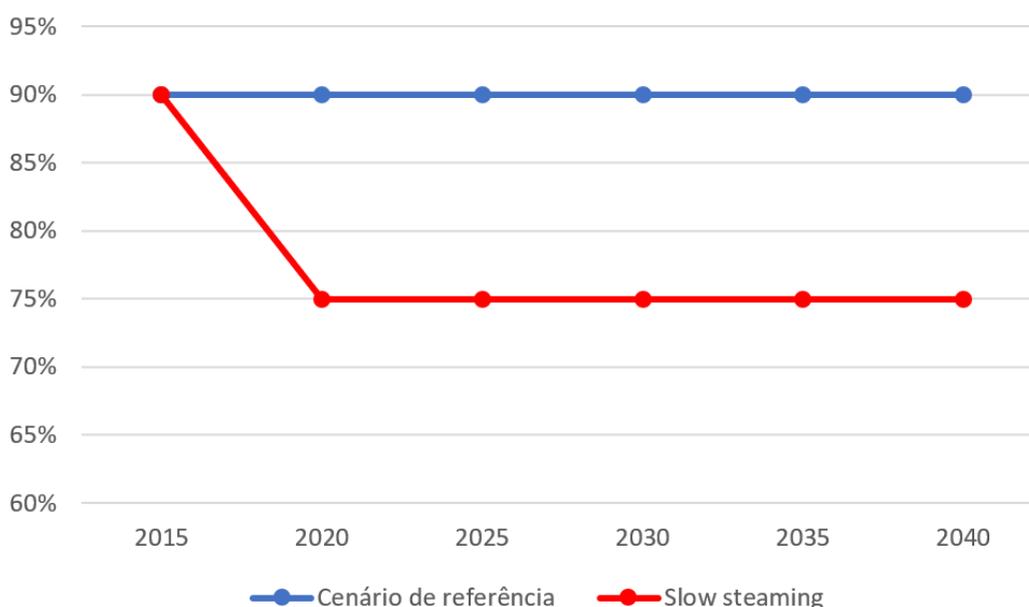


Figura 4.18: Razão entre velocidades real e de projeto - *slow steaming*

Fonte: Elaboração própria

A fim de se representar o impacto da navegação em velocidades mais baixas sobre a quantidade total de navios, introduziu-se na equação 4.5.2 o coeficiente

$$c_{ss} = \frac{1}{1 - x}, \quad (4.45)$$

sendo x a redução percentual de velocidade [136]. Trata-se de uma estimativa conservadora do aumento do número de navios, pois, ao se aplicar a equação, desconsidera-se que o tempo gasto nas condições “ancorado” e “atracado” não depende da velocidade em curso.

³²Exceto por uma pequena mudança na projeção do número total de navios, conforme detalhado à frente.

³³A figura 4.18 é uma simplificação: conforme mostra a figura 4.12, a razão $v/v_{projeto}$ varia discretamente de uma categoria para outra no cenário de referência

4.5.3 Cenário 4 (*extra slow steaming*)

Através do cenário 4, visa-se projetar a demanda por combustíveis e as emissões de CO₂ associadas no caso de uma redução mais drástica das velocidades praticadas pelos petroleiros (*extra slow steaming*). Conceitualmente, a construção deste cenário é idêntica àquela apresentada na subseção 4.5.2.

Entretanto, os números são diferentes: conforme mostra a figura 4.19, a diminuição da velocidade é mais intensa neste cenário: assume-se que, a partir de 2020, toda a frota mundial de petroleiros passe a navegar com uma razão $v/v_{projeto} = 60\%$, ou seja, com velocidades entre 9 e 10 nós. O impacto sobre a quantidade de embarcações é bem mais significativo nesse caso (figura 4.20).

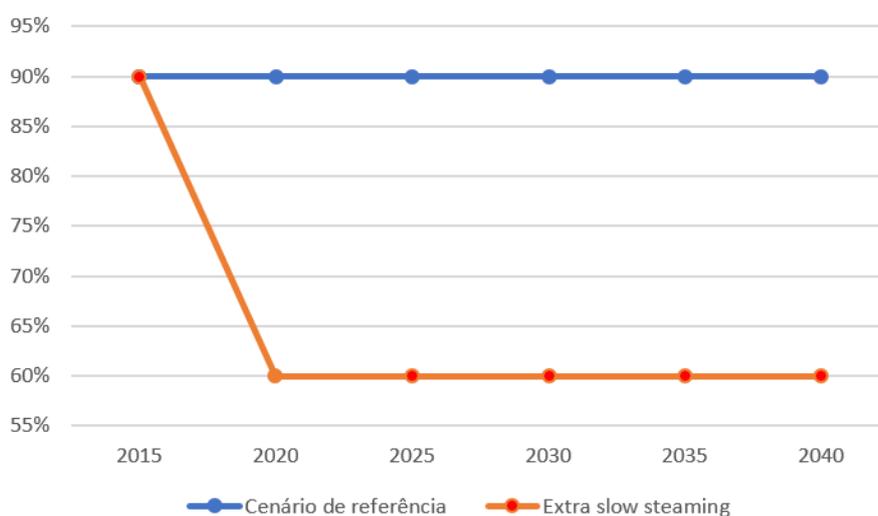


Figura 4.19: Razão entre velocidades real e de projeto - *extra slow steaming*

Fonte: Elaboração própria

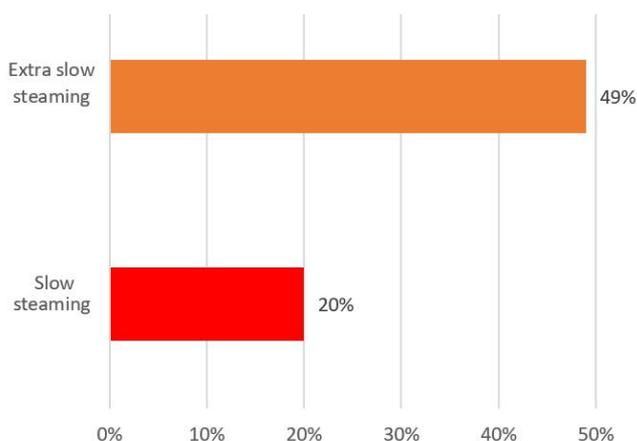


Figura 4.20: Aumento percentual do tamanho da frota nos cenários C3 e C4

Fonte: Elaboração própria

4.5.4 Cenário 5 (transição para GNL)

Conforme discutido no capítulo 3, a utilização do GNL na propulsão naval é uma realidade, ainda que incipiente. Por meio deste cenário, busca-se quantificar os efeitos de uma eventual transição do setor marítimo internacional para esse combustível sobre as emissões de CO₂ dos petroleiros analisados.

Os motores atualmente utilizados na indústria naval não estão tecnologicamente aptos a serem alimentados com gás natural [137]. Assim, num cenário de transição para o GNL, a utilização em larga escala do combustível dependeria da renovação da frota. Por isso, no âmbito da modelagem desenvolvida nesta dissertação, considerou-se uma entrada gradual da propulsão a gás nos petroleiros: partindo-se de uma frota inteiramente baseada em motores Diesel convencionais, supõe-se um crescimento gradativo do percentual de novos navios dotados de motores a gás ou *dual-fuel* (figura 4.21). De acordo com essa projeção, a partir de 2040, não são mais produzidos navios-tanque com motores Diesel convencionais.

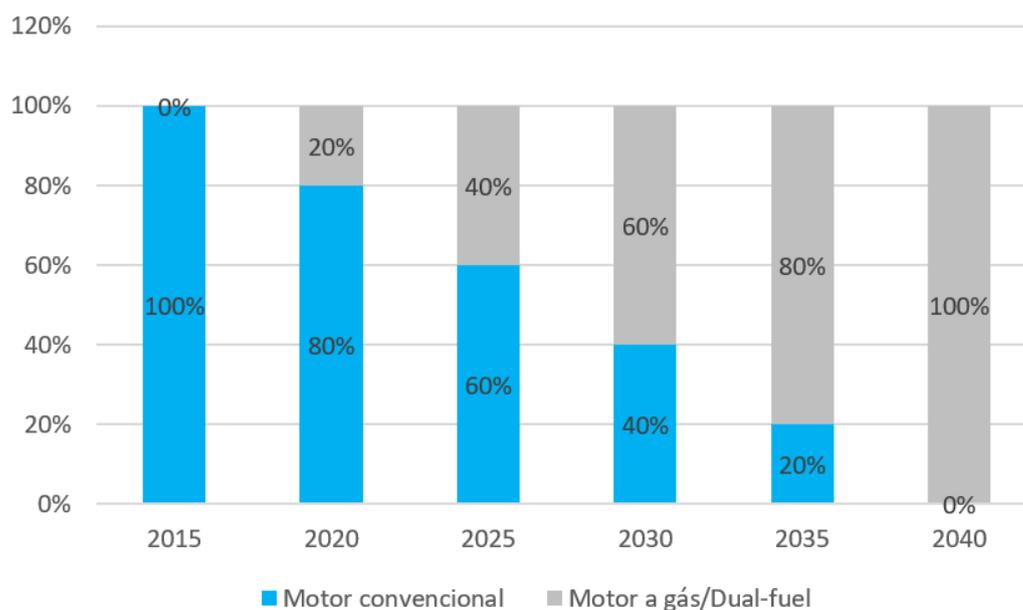


Figura 4.21: Proporção de novos navios contendo motores aptos a utilizar GNL

Fonte: Elaboração própria

Utilizou-se um consumo específico de 150 g/kWh [137] e um fator de emissão de 2,750 g CO₂/g combustível [26] para o GNL. De acordo com esses números, o fator de emissão do combustível, em base energia, é igual a 413 gCO₂/kWh, 30% inferior ao do bunker (592 gCO₂/kWh).

Note-se que a utilização do GNL restringiu-se ao sistema de propulsão. Consideraram-se mantidos os combustíveis do cenário de referência para os motores auxiliares (MGO) e caldeiras (HFO).

4.5.5 Cenário 6 (transição para biocombustíveis)

No cenário 6, estuda-se a introdução de biocombustíveis nos navios-tanque. Conforme explicado no capítulo 3, existem diversos caminhos possíveis para a penetração dos biocombustíveis no setor naval, tais como a utilização de MGO com *blends* de biodiesel em motores principais ou mesmo o uso de biogás para substituir, aos poucos, o GNL.

Nesta dissertação, optou-se por construir um cenário de biocombustíveis baseado na substituição completa³⁴ do bunker por óleo vegetal direto em motores principais. Pelo fato de o SVO ser altamente compatível com os motores atualmente utilizados na indústria naval, sua utilização poderia ser imediata, independentemente da renovação da frota, ao contrário do que ocorre com outros biocombustíveis e com o próprio GNL.

Como foi discutido no capítulo 3, o *blend* de SVO com HFO não parece ser uma alternativa viável, sendo preferível a substituição completa de um combustível pelo outro. Por isso, no contexto do cenário 6, considera-se que parte dos navios funciona usando 100% de óleo vegetal direto no sistema propulsivo, enquanto o restante permanece totalmente abastecido por bunker. A quantidade de navios utilizando SVO aumenta gradativamente a partir de 2015, atingindo 50% dos navios em 2040 (figura 4.22).

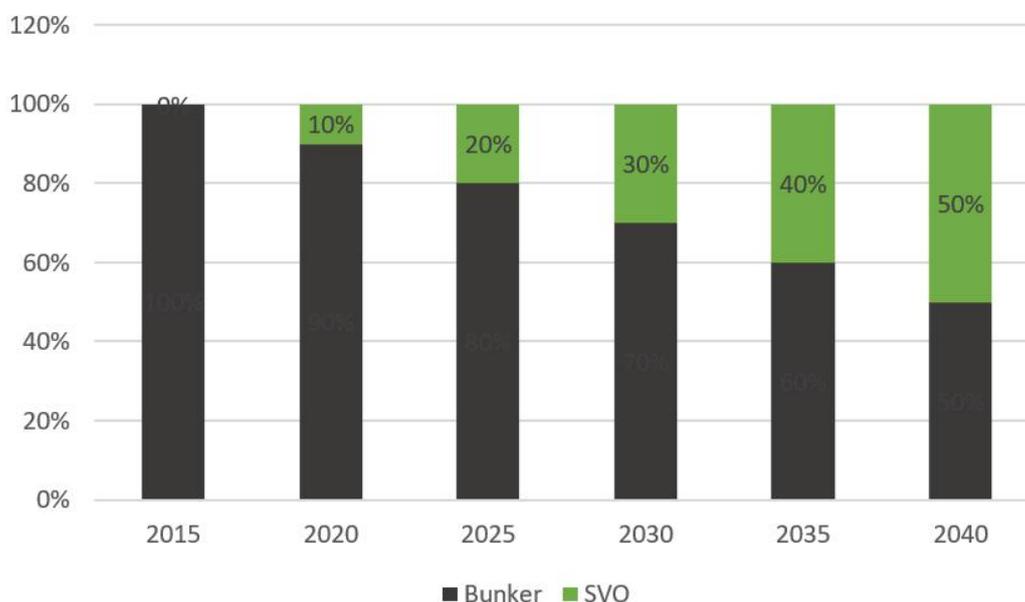


Figura 4.22: Percentual de navios utilizando SVO no motor principal

Fonte: Elaboração própria

O consumo específico de SVO foi considerado igual a 195 g/kWh [138].

³⁴Por “completa”, quer-se dizer sem processo de *blend*.

Neste cenário, considerou-se ainda a introdução de biodiesel nos motores auxiliares. Ao contrário do SVO, o biodiesel é apropriado para *blends* com o diesel marítimo, ainda que em pequenas proporções [59]. Por isso, em vez de restringir a utilização do combustível a apenas alguns navios, optou-se por modelar a entrada do biodiesel na frota mundial como um todo, misturado ao diesel marítimo em pequenos percentuais (figura 4.23). O consumo específico do biodiesel foi considerado igual a 187 g/kWh [139].

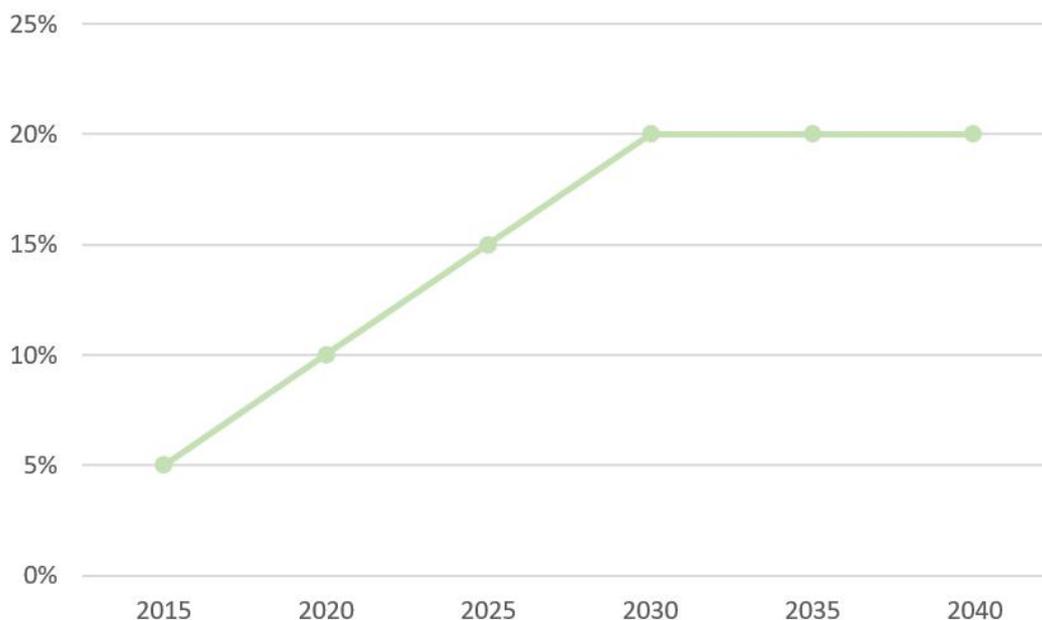


Figura 4.23: Percentual de biodiesel no diesel marítimo
Fonte: Elaboração própria

4.5.6 Cenário 7 (alta mitigação)

Finalmente, elaborou-se um cenário visando à representação do máximo aproveitamento do potencial de mitigação disponível. Este cenário de alta mitigação é composto pela combinação das premissas dos cenários 4 e 6, ou seja, trata-se de um cenário que conjuga o *extra slow steaming* com a introdução dos biocombustíveis.

Optou-se por essa composição pelo fato de essas serem as duas medidas mitigadoras das quais se espera maior impacto, sendo uma de caráter incremental (redução de velocidades) e a outra, de caráter estrutural (utilização de combustíveis de baixo carbono).

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo, apresentam-se os principais resultados da modelagem cujo desenvolvimento foi explicado no capítulo 4.

Na seção 5.1, mostra-se a evolução do comércio marítimo de petróleo no mundo até 2040 e discute-se brevemente o rearranjo geográfico dos fluxos de importação e exportação da *commodity*. Comenta-se ainda o papel dos estreitos de Ormuz e Málaca como gargalos do comércio internacional de óleo cru.

Na seção 5.2, expõem-se os resultados centrais desta dissertação: as trajetórias de consumo de combustíveis e de emissões por cenário, sendo o CO₂ apresentado de acordo com sua fonte (motores principais, auxiliares ou caldeiras). Mostram-se também as emissões acumuladas entre 2015 e 2040 em cada caso.

A repartição das emissões por origem e destino das rotas é apresentada e discutida na seção 5.3.

Alguns comentários referentes à metodologia de elaboração do EEDI são tecidos na seção 5.4. Questiona-se a validade do índice, sua congruência com a realidade e avalia-se seu impacto na análise dos cenários de referência e contrafactual.

Na seção 5.5, discute-se a relação entre a navegação em baixas velocidades e o tamanho da frota, analisando-se o impacto do *slow steaming* não apenas sobre o consumo de combustível em sistemas de propulsão, mas também em sistemas auxiliares. Finalmente, procura-se determinar se o *slow steaming* é interessante do ponto de vista de mitigação das emissões de CO₂ no setor marítimo.

A viabilidade de cenários em que há transição para novos combustíveis é apreciada na seção 5.6: na subseção 5.6.1, compara-se a evolução da demanda por GNL do cenário 5 aos números da indústria mundial do gás natural, e na subseção 5.6.2, examina-se o panorama da produção de óleos vegetais, confrontando-o aos resultados do cenário 6.

5.1 Comércio internacional de petróleo

De acordo com a metodologia adotada para projeção da evolução do *trade* em cada rota (seção 4.1), o comércio internacional de petróleo por via marítima comporta-se, entre 2015 e 2040, conforme mostra a figura 5.1: ao longo do período, verifica-se um crescimento anual aproximadamente constante, entre 1 e 3% ao ano. Assim, o *trade* mundial de óleo cru realizado por navios atinge 2.100 Mt/ano em 2030 e 2.400 Mt/ano em 2040 (acréscimo de 19% e 35% em relação a 2015, respectivamente).

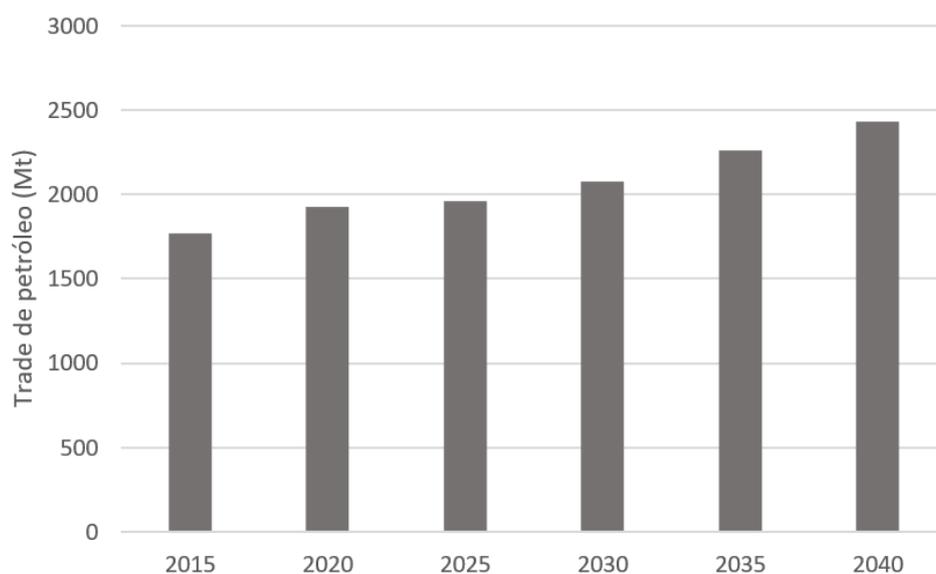


Figura 5.1: Evolução do comércio internacional de petróleo por via marítima

Fonte: Elaboração própria

Tal crescimento não reflete, no entanto, uma tendência global generalizada, devendo-se principalmente a um crescimento da demanda por óleo cru em países emergentes como China e Índia. Entre os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), percebe-se, ao contrário, uma tendência por estabilização ou mesmo redução do uso de petróleo (no caso dos Estados Unidos especificamente, o grande aumento da produção interna é um agravante, pois contribui ainda mais para a diminuição das importações).

A figura 5.2 ilustra exatamente essa mudança: em 2015, aproximadamente 41% do petróleo exportado por hidrovias tem como destino países da OCDE, enquanto 55% tem como destino países integrantes do BRICS ou do *Next Eleven* (N-11)¹.

¹*Next Eleven* ou Próximos Onze é o nome dado a um conjunto de países considerados de grande potencial de desenvolvimento econômico nas próximas décadas, ao lado do BRICS. São eles: Bangladesh, Egito, Indonésia, Irã, México, Nigéria, Paquistão, Filipinas, Coreia do Sul, Turquia e Vietnã [140].

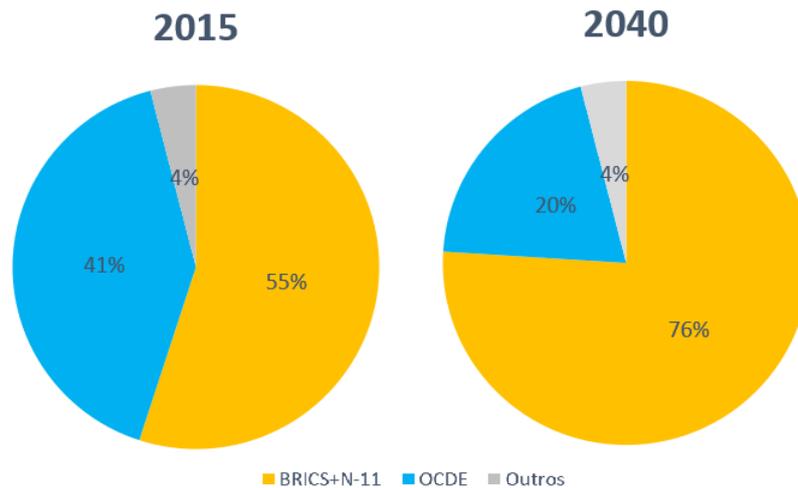


Figura 5.2: Repartição das importações de petróleo por grupo econômico
Fonte: Elaboração própria

Já em 2040, a participação percentual dos países desenvolvidos é de apenas 20%, ao passo que os países BRICS+N-11 respondem por mais de 3/4 do petróleo importado por via marítima. Boa parte desses fluxos diz respeito à Ásia: subcontinente indiano, Sudeste Asiático e China são os principais responsáveis pelo crescimento das importações de óleo cru.

Nesse sentido, cabe um comentário acerca dos gargalos marítimos do comércio internacional de petróleo (*oil transit chokepoints*, figura 5.3). Os *oil chokepoints* são definidos como passagens estreitas contidas em rotas marítimas de grande importância para o transporte de petróleo bruto. Alguns desses gargalos são apertados ao ponto de existirem restrições quanto às dimensões das embarcações que podem atravessá-los [141][142].

No total, existem oito gargalos marítimos do comércio internacional de petróleo, entre os quais o Canal de Suez e o Canal do Panamá (figura 5.3). Entretanto, em termos de fluxo diário de navios petroleiros, os principais são, de longe, o estreito de Ormuz² e o estreito de Málaca³. Trata-se de pontos absolutamente estratégicos para a segurança energética global: através do estreito de Ormuz é escoada praticamente a totalidade da produção de petróleo do Oriente Médio enquanto o estreito de Málaca é o caminho mais curto entre o oceano Índico e os grandes mercados do Leste da Ásia [141][142].

Tendo em vista que esses dois pontos de estrangulamento do transporte marítimo estão sujeitos a condições de trânsito delicadas [142] e à influência de fatores geopolíticos [143], o intenso fluxo de petróleo que os atravessa causa preocupação.

²O estreito de Ormuz une o Golfo Pérsico ao Golfo de Omã.

³O estreito de Málaca situa-se entre a Península Malaia e a ilha de Sumatra (Indonésia).

Movimentação de petróleo (milhões de barris por dia)

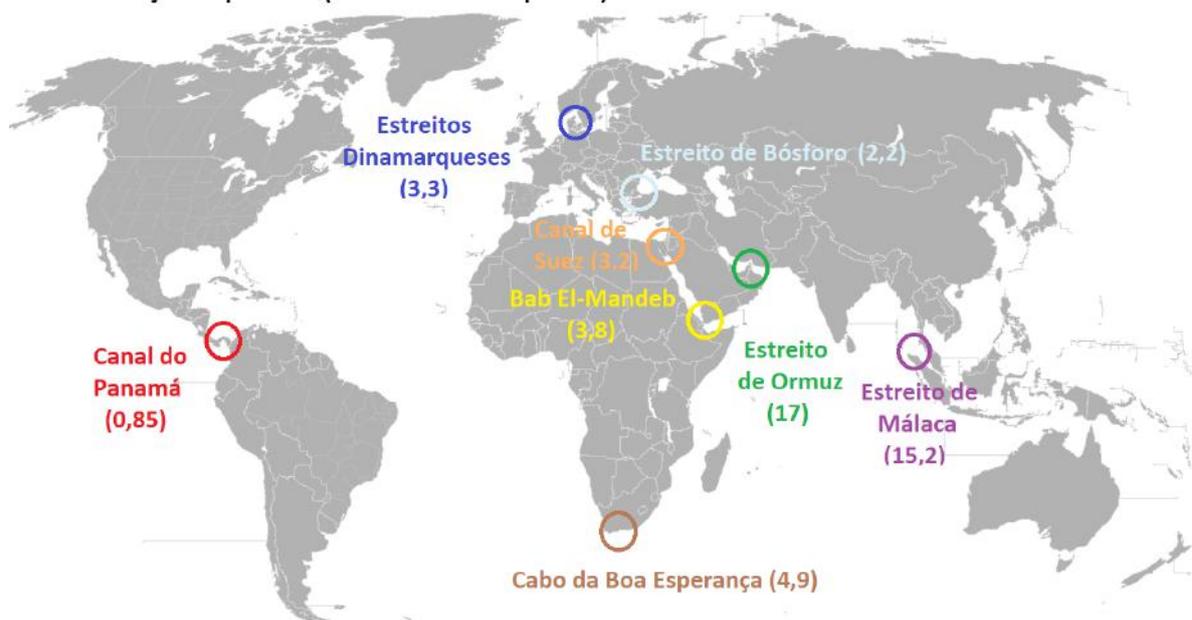


Figura 5.3: Gargalos marítimos do comércio internacional de petróleo

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [141]

Em 2013, os estreitos de Ormuz e Málaca registraram, respectivamente, a afluência de 17,0 e 15,5 milhões de barris por dia, parcelas consideráveis do *trade* marítimo global de óleo cru. Segundo a projeção desenvolvida, a expansão do mercado asiático e a manutenção de países como Arábia Saudita, Catar e Emirados Árabes Unidos como grandes exportadores farão com que o fluxo de navios petroleiros através desses gargalos intensifique-se ainda mais: em 2040, calculam-se fluxos de 25,5 mb/d e 25,0 mb/d, respectivamente, em Ormuz e Málaca (figura 5.4).

Tal aumento pode provocar a saturação dos dois *chokepoints*, tornando necessária a abertura de vias alternativas. No caso de um bloqueio do estreito de Málaca, os navios passariam a ter que contornar o arquipélago indonésio, fazendo uso de passagens alternativas como o estreito de Lombok, o que sobrecarregaria a frota mercante mundial e aumentaria os custos das transportadoras, possivelmente afetando o preço da energia [142].

No caso do estreito de Ormuz, não existem caminhos marítimos alternativos e, assim, a única opção seria um *bypass* por meio de oleodutos desembocando diretamente no mar Árábico. Conforme mostra a figura 5.5, a grande maioria dos dutos da região destina-se ao Golfo Pérsico e os poucos caminhos possíveis para contornar o estreito por terra não se encontram operacionais [142].

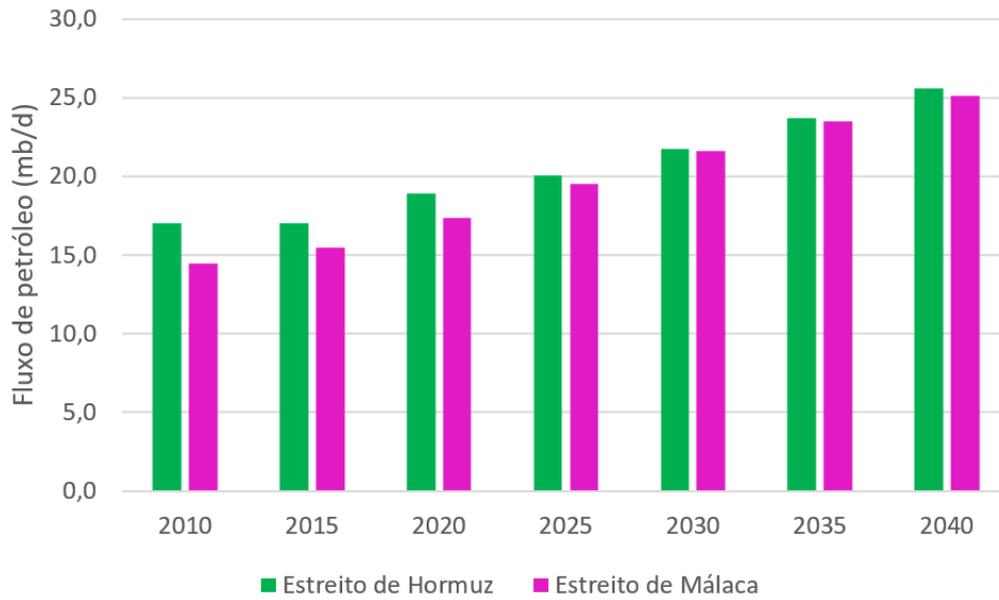


Figura 5.4: Evolução do fluxo diário de petróleo através de Ormuz e Málaca
Fonte: Elaboração própria



Figura 5.5: Principais terminais de petróleo na Península Arábica
Fonte: Elaboração própria a partir de [144] com base em figura de [145]

5.2 Consumo de combustível e emissões de CO₂

A figura 5.6 mostra a evolução das emissões anuais de CO₂ nos sete cenários estudados. No cenário de referência (C1), diante de um contexto de crescimento do comércio internacional de petróleo, tem-se um aumento gradual das emissões de gás carbônico. Esse crescimento é limitado, no entanto, pela maior eficiência dos navios construídos a partir de 2020, o que mantém as emissões anuais em torno de 95 MtCO₂ entre 2025 e 2040.

Por meio do cenário contrafactual (C2), que desconsidera a obrigatoriedade de observância dos requisitos do EEDI, tem-se uma primeira quantificação do benefício gerado pelos ganhos de eficiência no cenário 1: com o consumo específico constante ao longo dos anos, o aumento do nível anual de emissões é muito mais pronunciado (112 MtCO₂ em 2030, 121 MtCO₂ em 2040).

Os cenários de *slow steaming* (C3 e C4) têm perfis bastante semelhantes, embora a diferença entre as emissões anuais de cada um seja sensível. Em ambos os casos, ocorre, num primeiro momento, uma abrupta queda do CO₂ emitido anualmente. As emissões voltam a crescer, no entanto, a partir de 2030, atingindo 83 MtCO₂ (C3) e 73 MtCO₂ (C4) em 2040.

No cenário de transição para o GNL (C5), em curto prazo, o CO₂ emitido anualmente é praticamente congruente com o cenário de referência. A partir de 2030, com uma maior penetração de petroleiros com motor a gás, verifica-se um descolamento das curvas, que se deve ao teor de carbono reduzido do gás natural. Em 2040, as emissões anuais são iguais às de 2015 (87 MtCO₂).

A trajetória do cenário C6, marcado pelo uso de combustíveis não fósseis, é decrescente ao longo de todo o período. Com biocombustíveis *drop-in*, os esforços de mitigação independem da renovação da frota e, assim, as emissões caem mais rapidamente. Em 2040, as emissões anuais de CO₂ caem a 53 Mt.

No cenário 7, que combina duas estratégias de mitigação, há um impacto de curto prazo que se deve sobretudo à redução de velocidade. Tal redução é sustentada, em longo prazo, pela ascensão dos biocombustíveis. A trajetória é declinante ao longo de todo o período analisado e as emissões anuais em 2040 são iguais a 43 MtCO₂.

Na figura 5.7, mostram-se as emissões acumuladas ao longo do período 2015-2040 para cada um dos cenários desenvolvidos, enquanto, na figura 5.8, veem-se os percentuais de emissões evitadas em relação ao cenário de referência.

A seguir, detalham-se os resultados mais relevantes de cada cenário. Os resultados completos são mostrados nas tabelas do anexo B.

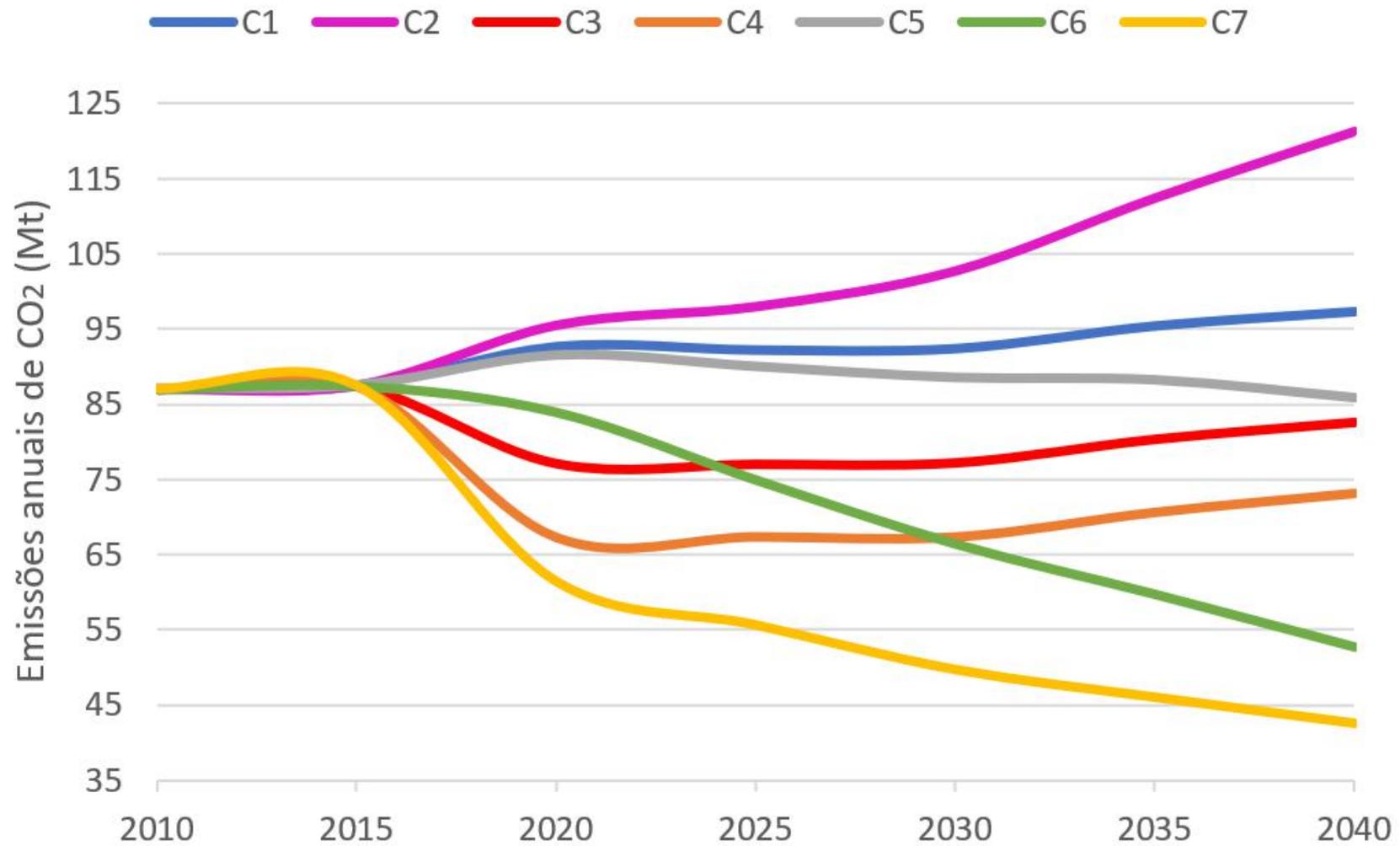


Figura 5.6: Evolução das emissões anuais de CO₂ nos sete cenários

Fonte: Elaboração própria

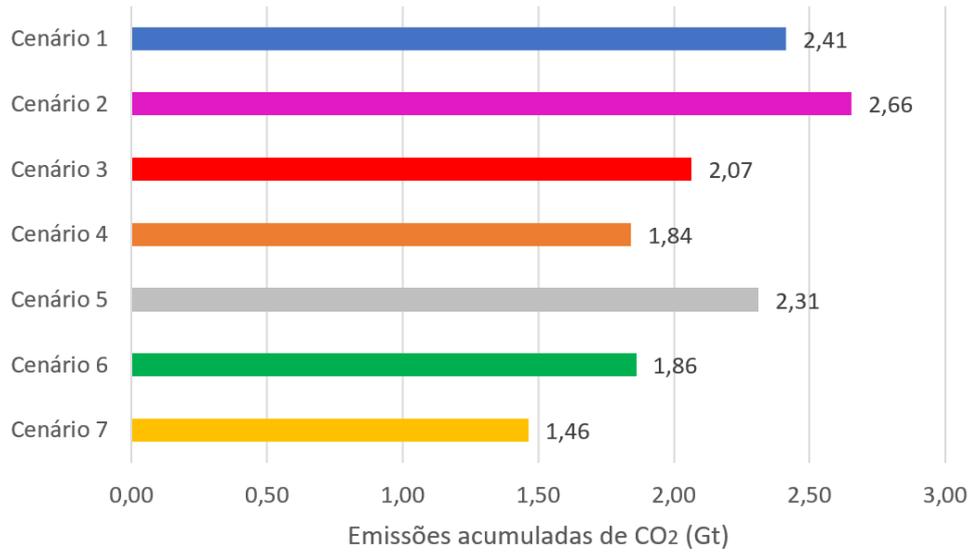


Figura 5.7: Emissões acumuladas de CO₂ nos sete cenários
Fonte: Elaboração própria

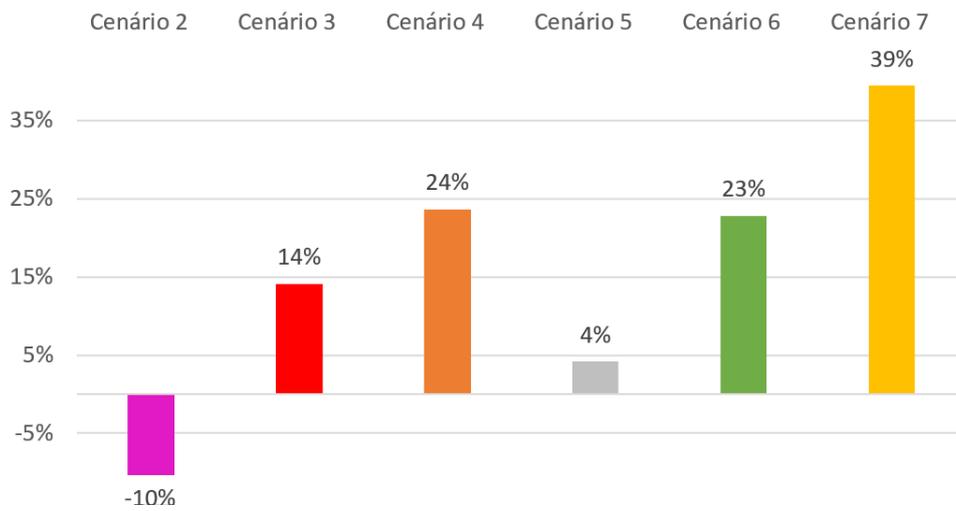


Figura 5.8: Percentual de emissões evitadas em relação ao cenário de referência
Fonte: Elaboração própria

5.2.1 Cenário 1

Tendo em vista a manutenção do paradigma setorial no cenário de referência, o consumo de derivados de petróleo aumenta entre 2015 e 2040 (figura 5.9). Tal aumento é limitado, contudo, pelos ganhos de eficiência promovidos pela política de *compliance* com o EEDI. A demanda por bunker, por exemplo, passa de 23.900 kt em 2015 para 26.600 kt em 2040.

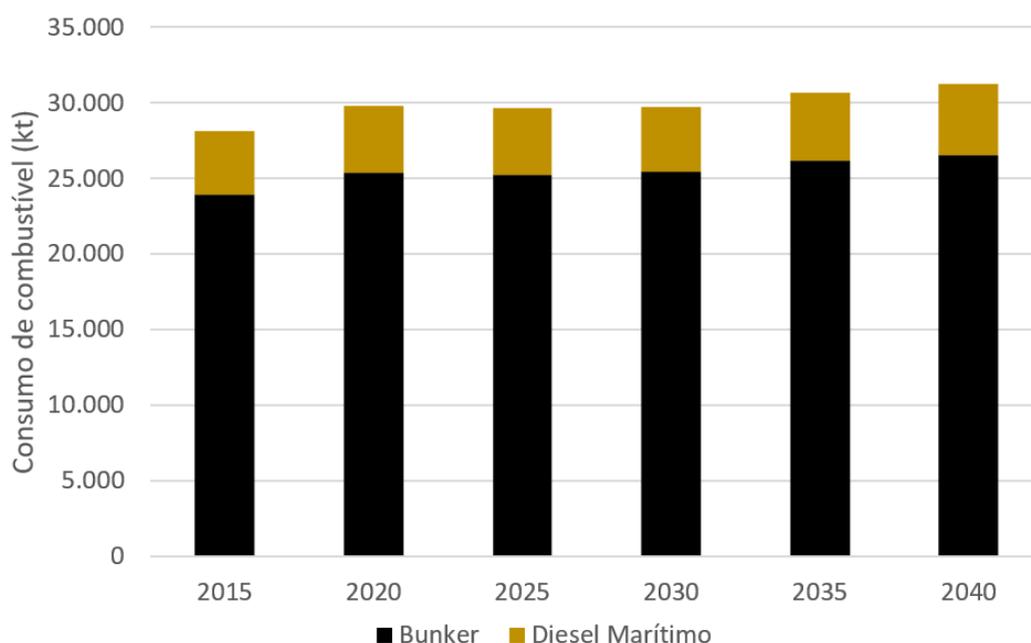


Figura 5.9: Consumo de combustíveis - cenário 1

Fonte: Elaboração própria

A evolução das emissões anuais (figura 5.10) segue o perfil do consumo de combustíveis: apesar de o CO_2 emitido aumentar continuamente, o crescimento total observado entre 2015 e 2040 é discreto (de 87 para 97 MtCO_2 , isto é, 11%). Ao longo do período 2015-2020, tem-se o maior incremento (figura 5.11). Entre 2020 e 2030, há uma estabilização e, a partir de 2030, as emissões voltam a crescer.

Note-se que a proporção entre as emissões advindas de motores principais, auxiliares e caldeiras mantém-se aproximadamente constante ao longo do período considerado (motores principais $\sim 75\%$, motores auxiliares $\sim 15\%$, caldeiras $\sim 10\%$).

No cenário 1, a frota de petroleiros de óleo cru cresce continuamente ao longo do período considerado: de 1.956 navios em 2015 para 2.242 embarcações em 2030 e 2.642 em 2040.

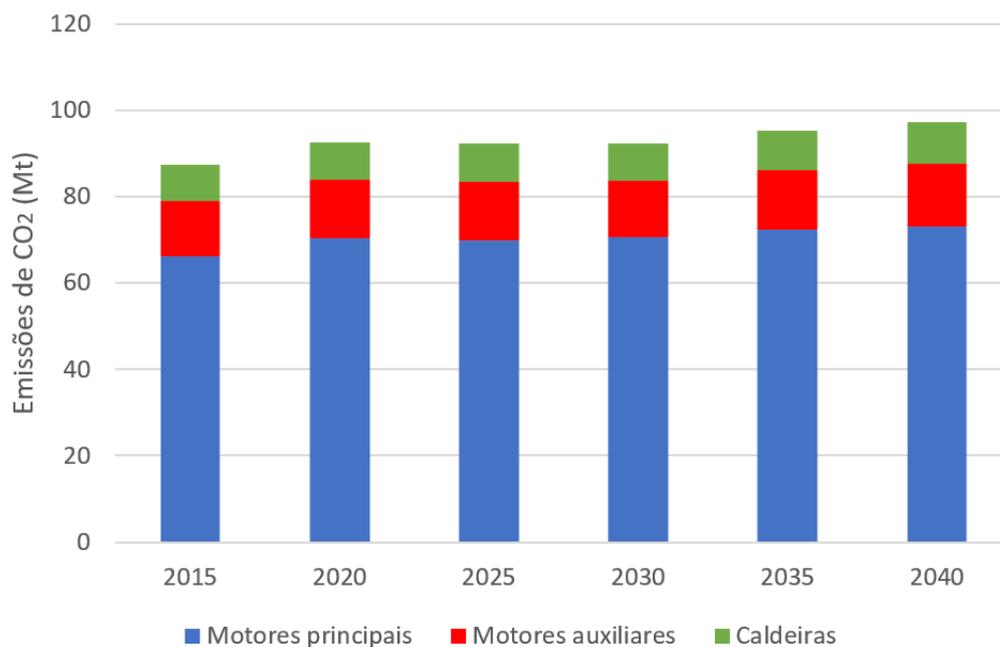


Figura 5.10: Emissões de CO₂ - cenário 1

Fonte: Elaboração própria

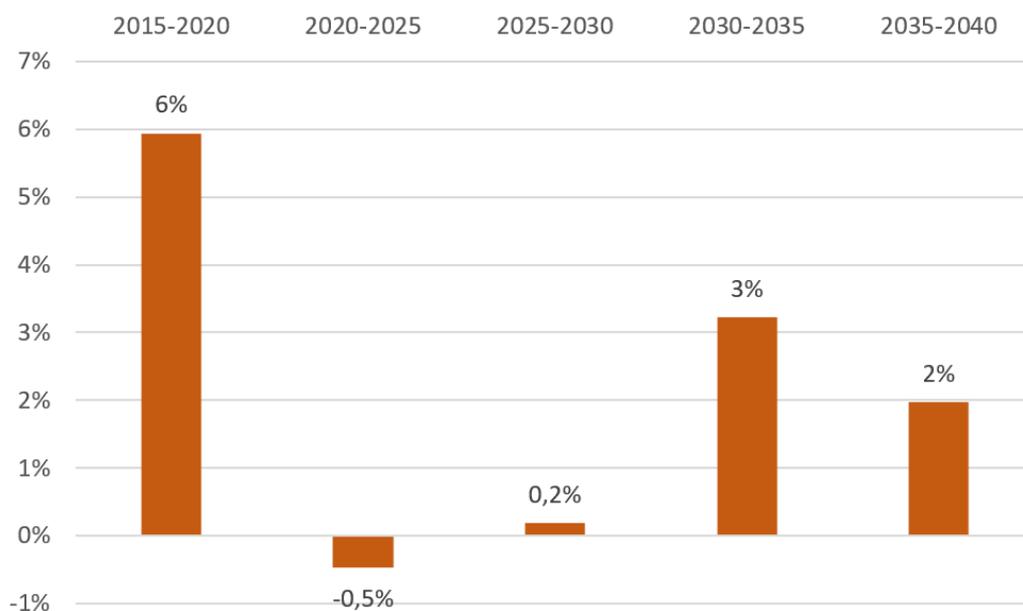


Figura 5.11: Crescimento percentual das emissões por período - cenário 1

Fonte: Elaboração própria

5.2.2 Cenário 2

Dada a hipótese de eficiência congelada, verifica-se, no cenário contrafactual, um acentuado aumento do consumo de combustíveis marítimos convencionais (figura 5.12). A demanda por bunker em 2040 é igual a 33.500 kt, 26% superior ao consumo do mesmo ano no cenário de referência e 40% superior à demanda de 2015.

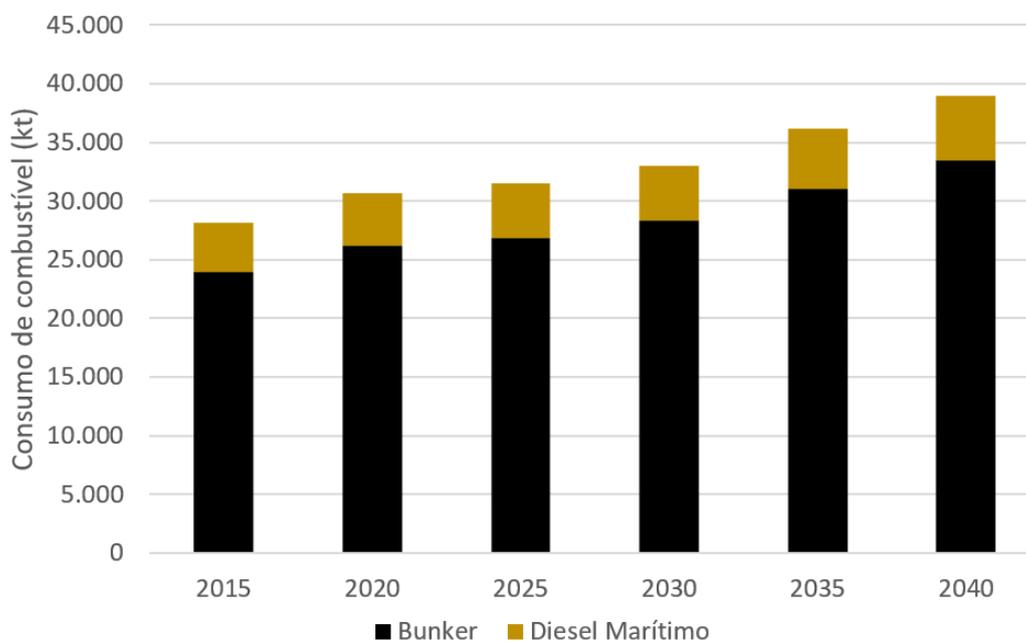


Figura 5.12: Consumo de combustíveis - cenário 2

Fonte: Elaboração própria

Naturalmente, o crescimento do nível anual de emissões de CO₂ é também mais intenso no cenário 2 (figura 5.13). De 87 MtCO₂ em 2015, as emissões saltam para 103 MtCO₂ em 2030 e para 121 MtCO₂ em 2040. Entre 2030 e 2040, as emissões aumentam a taxas mais elevadas (figura 5.14).

Assim como no cenário de referência, a proporção entre as emissões provenientes de motores principais, auxiliares e caldeiras mantém-se aproximadamente constante, conforme indica a figura 5.13.

A evolução do tamanho da frota no cenário contrafactual é idêntica àquela do cenário de referência: de 1.956 navios em 2015, passa-se a 2.242 embarcações em 2030 e a 2.642 em 2040.

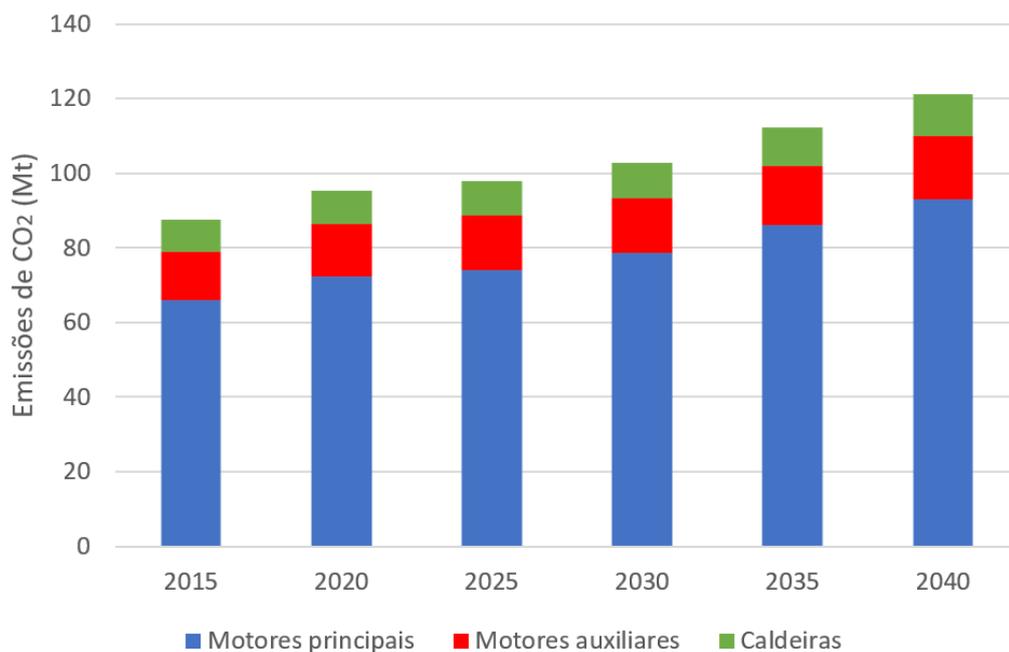


Figura 5.13: Emissões de CO₂ - cenário 2

Fonte: Elaboração própria

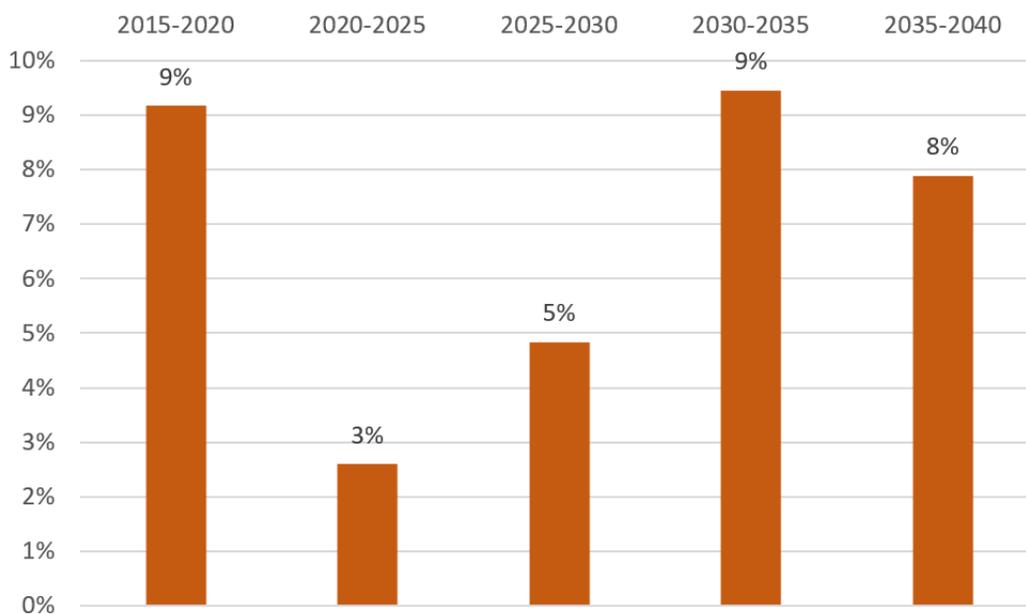


Figura 5.14: Crescimento percentual das emissões por período - cenário 2

Fonte: Elaboração própria

5.2.3 Cenário 3

No cenário de *slow steaming* moderado, o consumo de combustíveis marítimos tem comportamento ambíguo. A redução das velocidades praticadas, aliada aos ganhos de eficiência relacionados ao EEDI, provoca substancial redução do consumo de bunker (figura 5.15): mesmo com o comércio internacional de petróleo em plena expansão, o consumo de óleo residual cai de 23.900 kt para 20.900 kt entre 2015 e 2040. No entanto, sob um regime de velocidades mais baixas e, conseqüentemente, com maiores tempos de viagem, passa a haver necessidade de uma frota mais numerosa, o que aumenta a demanda de energia total em motores auxiliares. De 1.956 petroleiros em 2015, passa-se a 2.690 em 2030 e a 3.171 embarcações em 2040. Coerentemente, verifica-se um aumento no consumo global de diesel marítimo: a demanda por MGO é de 4.200 kt em 2015 e de 5.700 kt em 2040 (aumento de 36%).

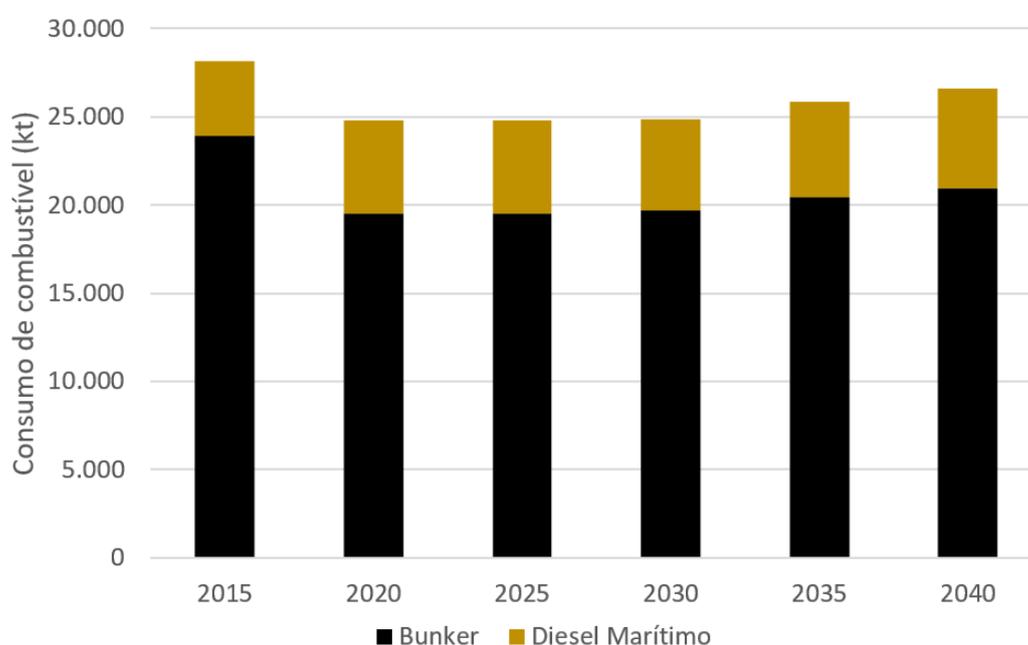


Figura 5.15: Consumo de combustíveis - cenário 3

Fonte: Elaboração própria

Ao se observar o comportamento das emissões de CO₂ (figuras 5.16 e 5.17), percebe-se tanto o efeito do aumento do consumo de diesel marítimo como a influência da diminuição da demanda por bunker: as emissões de motores principais caem de 67 Mt em 2015 para 50 Mt em 2020, quando o *slow steaming* tem início, crescendo suavemente até 53 Mt em 2040. Por outro lado, nota-se um aumento de 31% (13 para 17 Mt) nas emissões advindas de motores auxiliares. Entretanto, tal aumento não é suficiente para o benefício devido ao menor consumo de HFO.

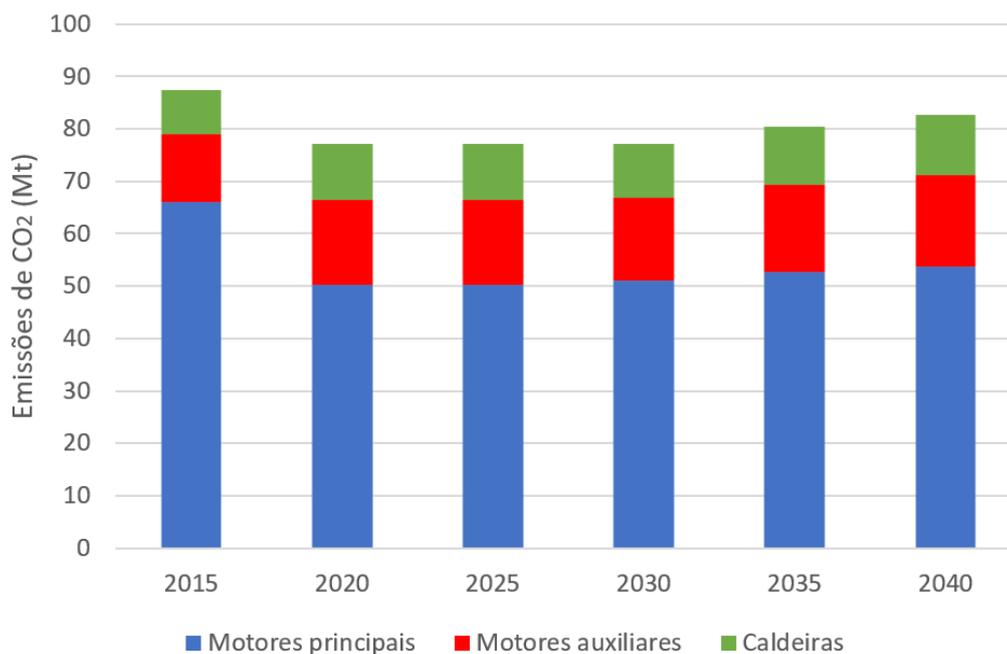


Figura 5.16: Emissões de CO₂ - cenário 3

Fonte: Elaboração própria

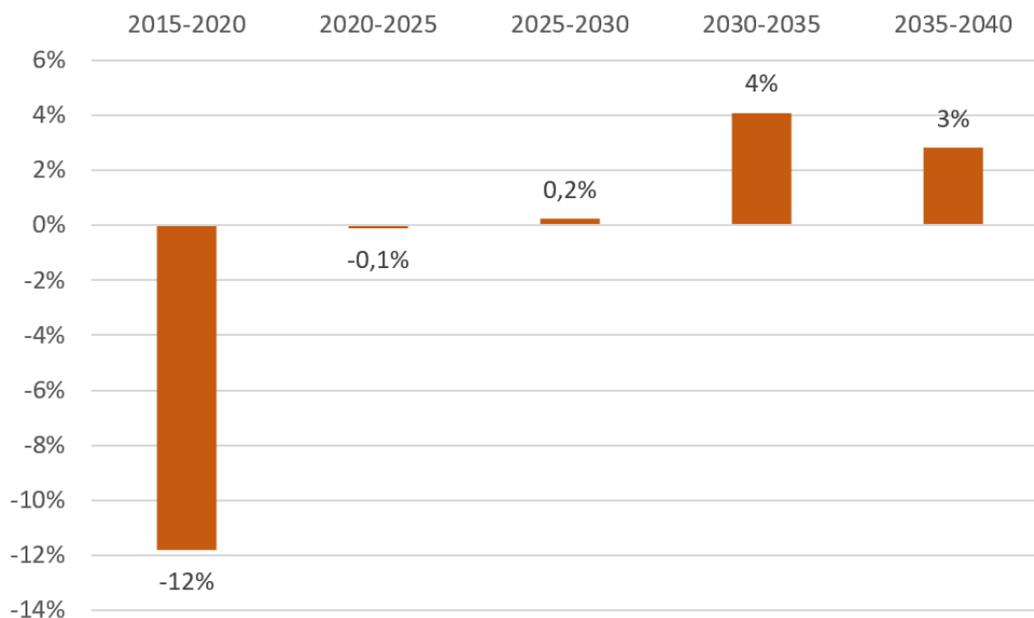


Figura 5.17: Crescimento percentual das emissões por período - cenário 3

Fonte: Elaboração própria

5.2.4 Cenário 4

Conceitualmente, o cenário 4 é bastante semelhante ao cenário 3: assim como o *slow steaming* moderado, o *extra slow steaming* provoca redução do consumo de HFO e aumento do consumo de MGO. O impacto observado no cenário 4 é, no entanto, ainda maior: entre 2015 e 2020, o consumo de bunker cai de 23.900 kt para 15.000 kt, atingindo o máximo de 16.500 kt em 2040.

Ao mesmo tempo, com a navegação a baixas velocidades, a demanda por novos navios cresce consideravelmente: em 2030, a frota é composta por 3.363 petroleiros e, em 2040, por 3.963 navios. Assim, a demanda por diesel marítimo aumenta 70% no período considerado (de 4.200 kt em 2015 para 7.100 kt em 2040).

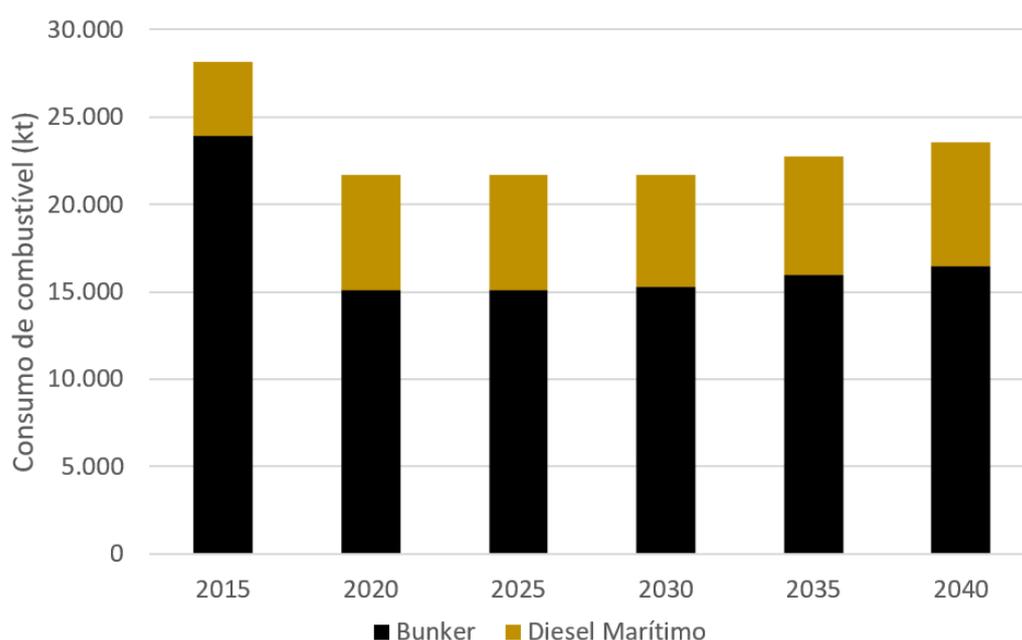


Figura 5.18: Consumo de combustíveis - cenário 4

Fonte: Elaboração própria

Os reflexos da redução do consumo de bunker e do aumento do consumo de MGO, em termos de emissões de CO₂, são mostrados nas figuras 5.19 e 5.20. A queda das emissões globais é flagrante, sobretudo no período 2015-2020, quando as emissões anuais caem de 87 MtCO₂ para 67 MtCO₂ (23%). A proporção entre as emissões advindas de motores principais, auxiliares e caldeiras muda drasticamente (~ 50% motores principais, ~ 30% motores auxiliares, ~ 20% caldeiras). Note-se que, neste cenário, boa parte da demanda por óleo residual relaciona-se às caldeiras.

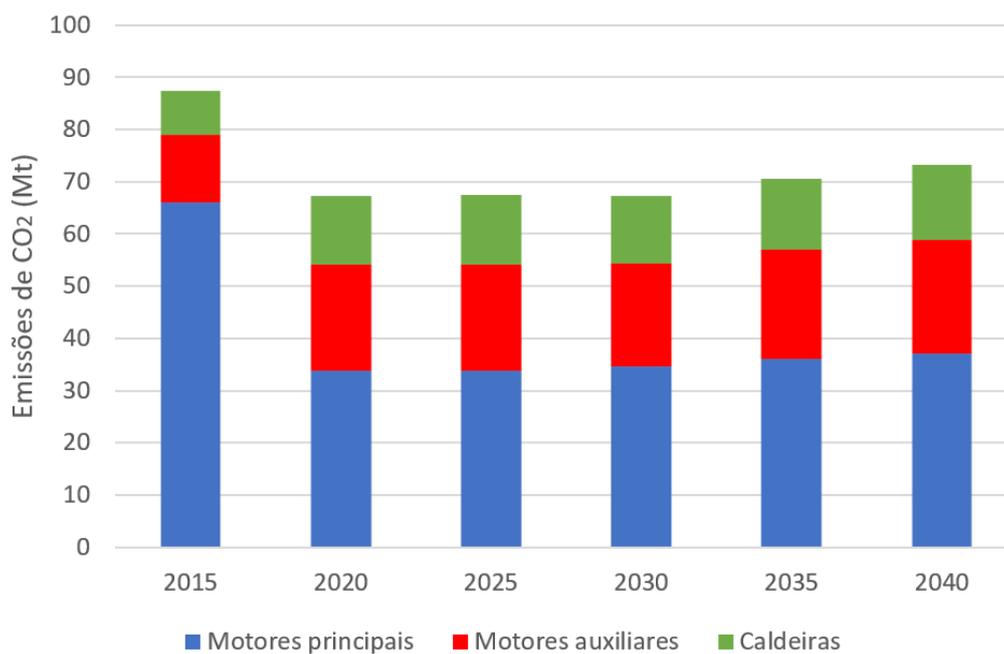


Figura 5.19: Emissões de CO₂ - cenário 4
Fonte: Elaboração própria

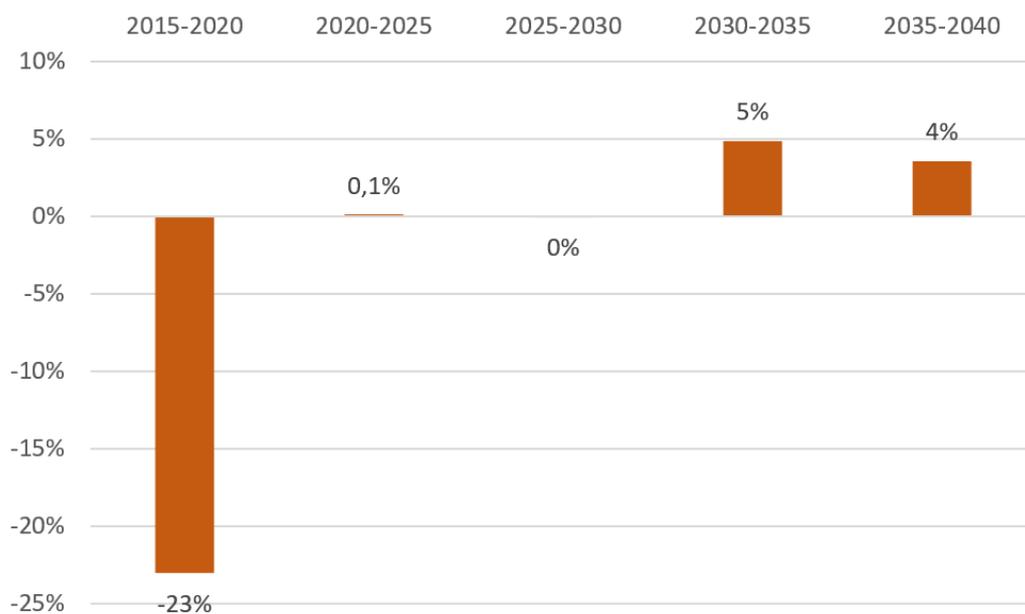


Figura 5.20: Crescimento percentual das emissões por período - cenário 4
Fonte: Elaboração própria

5.2.5 Cenário 5

No cenário de transição para o GNL, até 2025, o gráfico de consumo de combustíveis (figura 5.21) assemelha-se bastante àquele do cenário de referência. Entretanto, a partir de 2030, com a renovação da frota de petroleiros, o gás natural passa a ganhar mais espaço: o consumo do combustível aumenta consideravelmente, freando a demanda por bunker. Em 2040, o GNL atinge a marca de 9.400 kt, enquanto o consumo de HFO é reduzido a 14.600 kt (45% a menos que o consumo do mesmo ano no cenário de referência). A evolução do consumo de MGO é idêntica à do cenário 1.

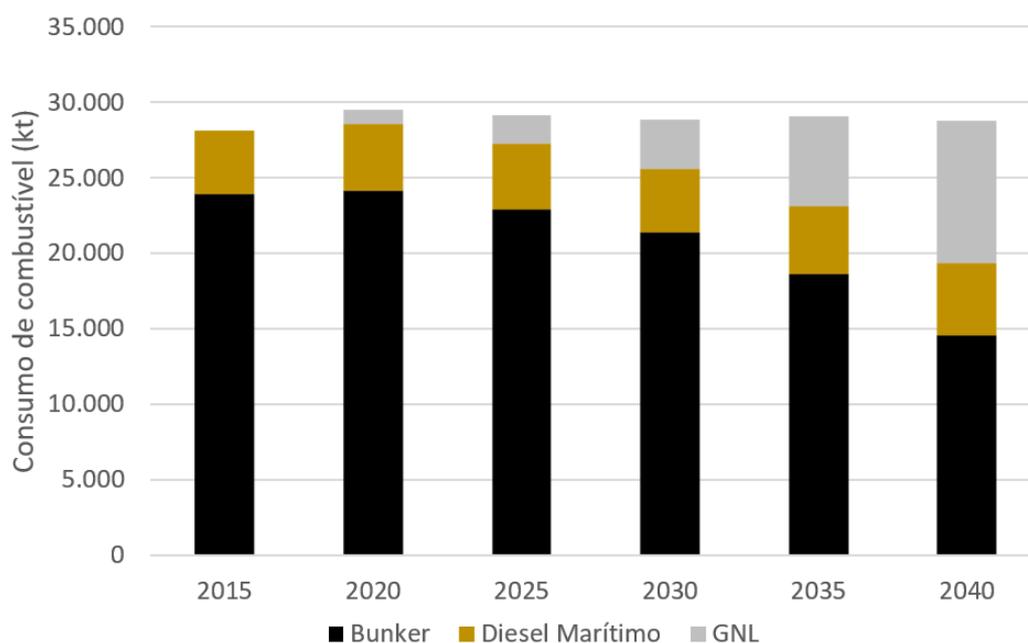


Figura 5.21: Consumo de combustíveis - cenário 5

Fonte: Elaboração própria

Em relação ao CO₂ emitido (figuras 5.22 e 5.23), verifica-se, em longo prazo, um ganho em relação ao cenário de referência. Graças ao teor de carbono reduzido do GNL, as emissões de motores principais sofrem uma queda substancial a partir de 2030, chegando a 62 Mt em 2040. Neste mesmo ano, as emissões globais são iguais a 86 Mt, 13% inferiores àsquelas do cenário 1.

A proporção entre emissões provenientes de motores principais, auxiliares e caldeiras mantém-se aproximadamente constante ao longo da primeira década. Entre 2030 e 2040, com uma maior participação do gás natural, percebe-se uma ligeira redução da contribuição dos motores principais.

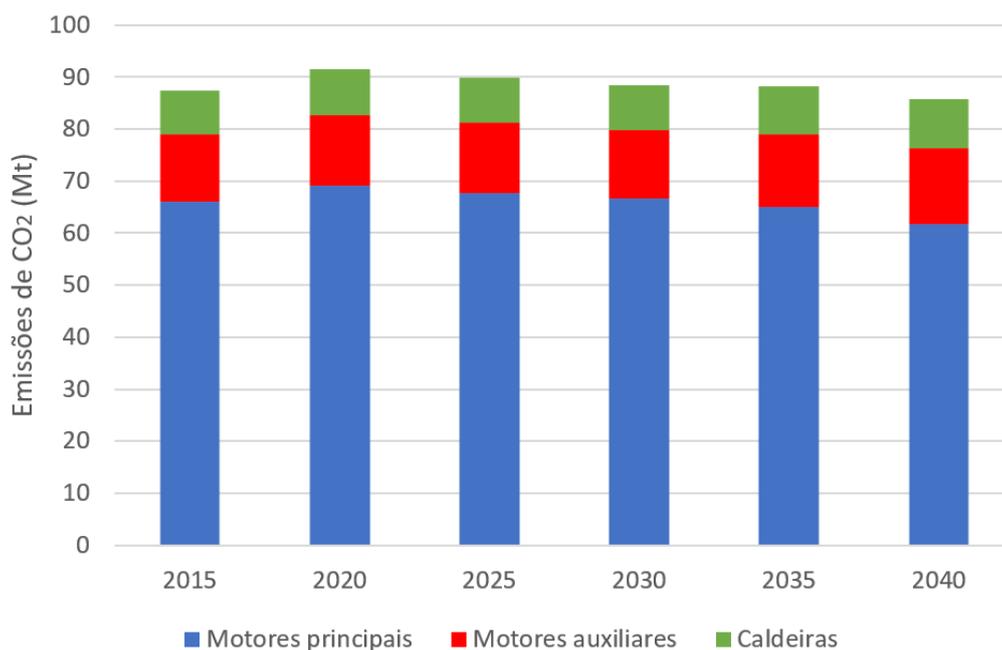


Figura 5.22: Emissões de CO₂ - cenário 5
Fonte: Elaboração própria

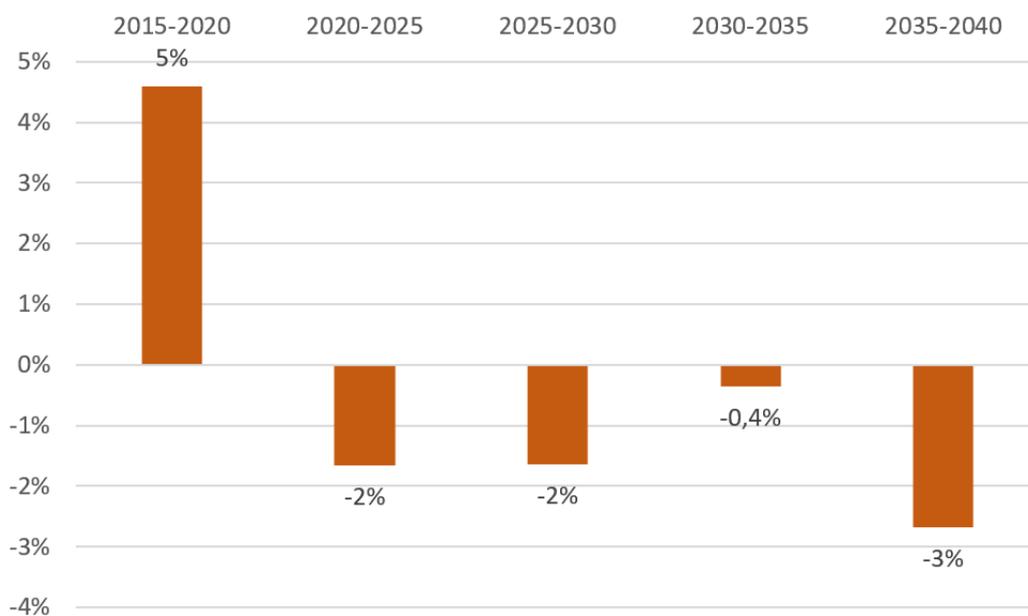


Figura 5.23: Crescimento percentual das emissões por período - cenário 5
Fonte: Elaboração própria

5.2.6 Cenário 6

O cenário 6 é marcado pela gradual troca de fontes fósseis de energia por biocombustíveis. Ao contrário do que ocorre com o GNL, a natureza *drop-in* dos biocombustíveis utilizados permite que os esforços de mitigação tenham resultados mais imediatos. Conforme mostra o gráfico da figura 5.24, a substituição progressiva do bunker por óleo vegetal direto promove uma redução vertiginosa na demanda por HFO (entre 2015 e 2040, redução de 23.900 kt/ano para 13.300 kt/ano). Por outro lado, o consumo anual de SVO salta de 2.600 kt em 2015 para 13.600 kt em 2040.

A demanda por diesel marítimo também diminui, ainda que em escala bem menor. Conforme explicado no procedimento metodológico, considerou-se que o *blend* máximo de biodiesel no MGO seria de 20% e, assim, os volumes demandados desse biocombustível são bem menores (900 kt em 2040).

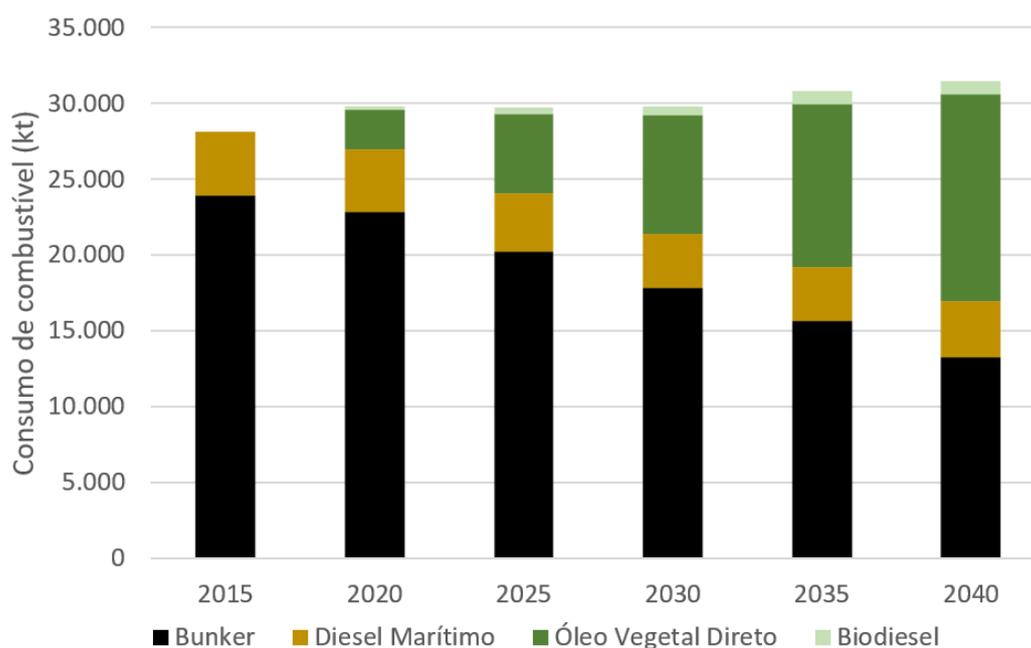


Figura 5.24: Consumo de combustíveis - cenário 6

Fonte: Elaboração própria

A introdução de biocombustíveis promove uma intensa redução das emissões anuais de CO₂, conforme ilustram as figuras 5.25 e 5.26. No cenário 6, o CO₂ emitido anualmente cai a 66 Mt em 2030 e a 53 Mt em 2040 (redução de 45% em relação ao cenário de referência).

Note-se que, neste caso, por conta das diferenças operacionais entre SVO e biodiesel, a mitigação é mais intensa nos motores principais e nas caldeiras, o que faz com que as emissões advindas de sistemas auxiliares ganhem importância ao longo do tempo (ou seja, proporcionalmente, sua contribuição aumenta).

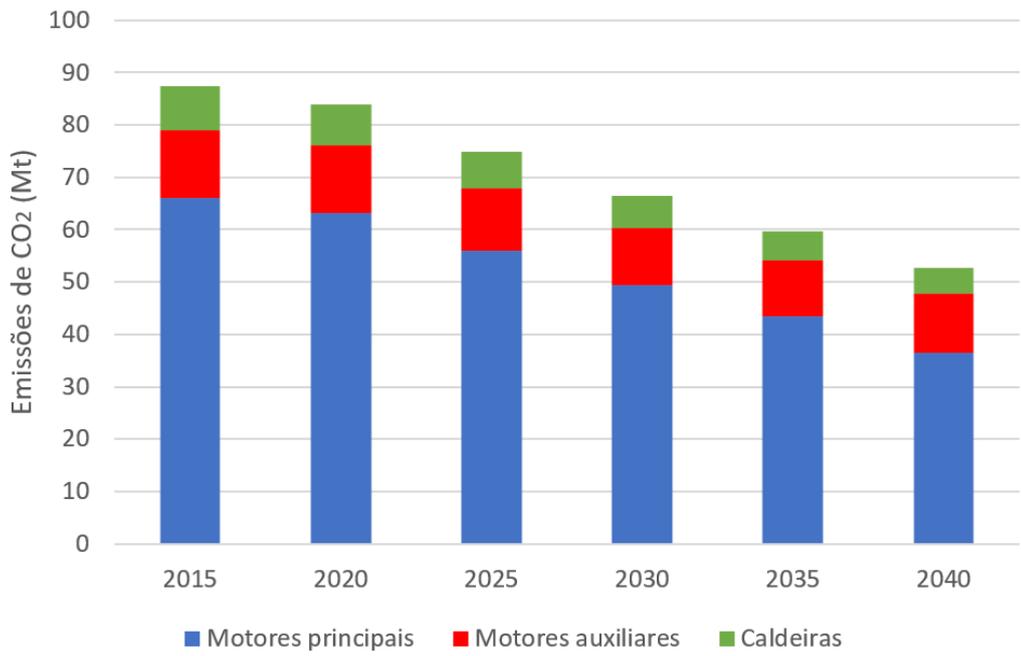


Figura 5.25: Emissões de CO₂ - cenário 6
Fonte: Elaboração própria

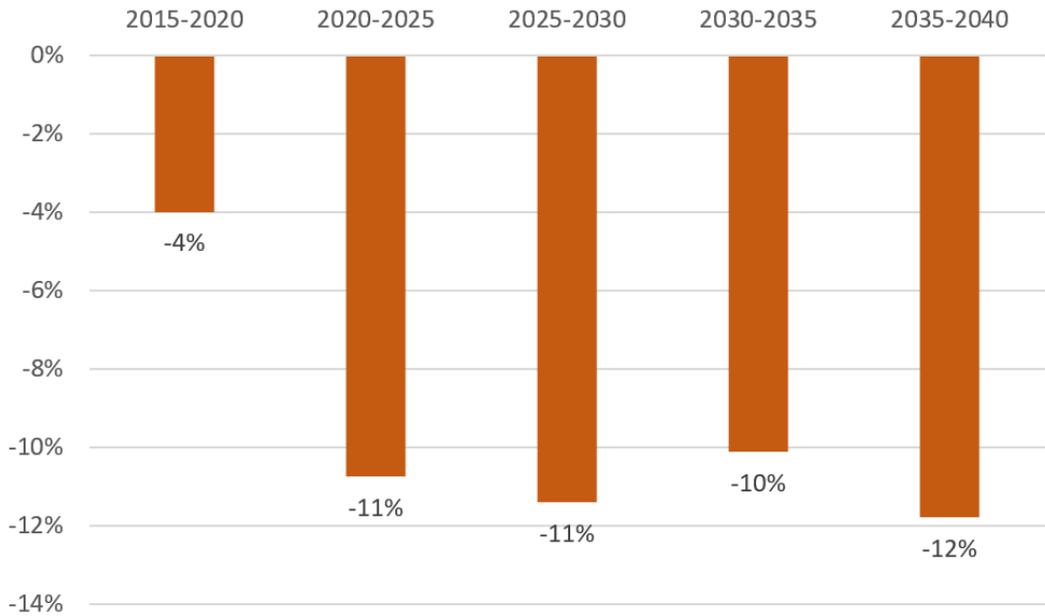


Figura 5.26: Crescimento percentual das emissões por período - cenário 6
Fonte: Elaboração própria

5.2.7 Cenário 7

No cenário de alta mitigação, combinam-se duas estratégias⁴ para reduzir as emissões totais de CO₂, quais sejam, a introdução de biocombustíveis e a mudança do padrão de velocidades dos navios. Daí resultam uma forte redução do consumo de combustíveis e uma drástica queda das emissões anuais de gás carbônico. A demanda por bunker cai de 23.900 kt em 2015 para 8.200 kt em 2040, tanto pelo advento do SVO como pela adoção do *extra slow steaming*.

Por outro lado, tendo em vista a numerosa frota⁵ necessária para compensar a redução das baixas velocidades praticadas, ocorre um sensível aumento do consumo de diesel marítimo (de 4.200 kt em 2015 para 5.500 kt em 2040).

Em 2040, o consumo de SVO é igual a 8.400 kt e o de biodiesel, a 1.300 kt.

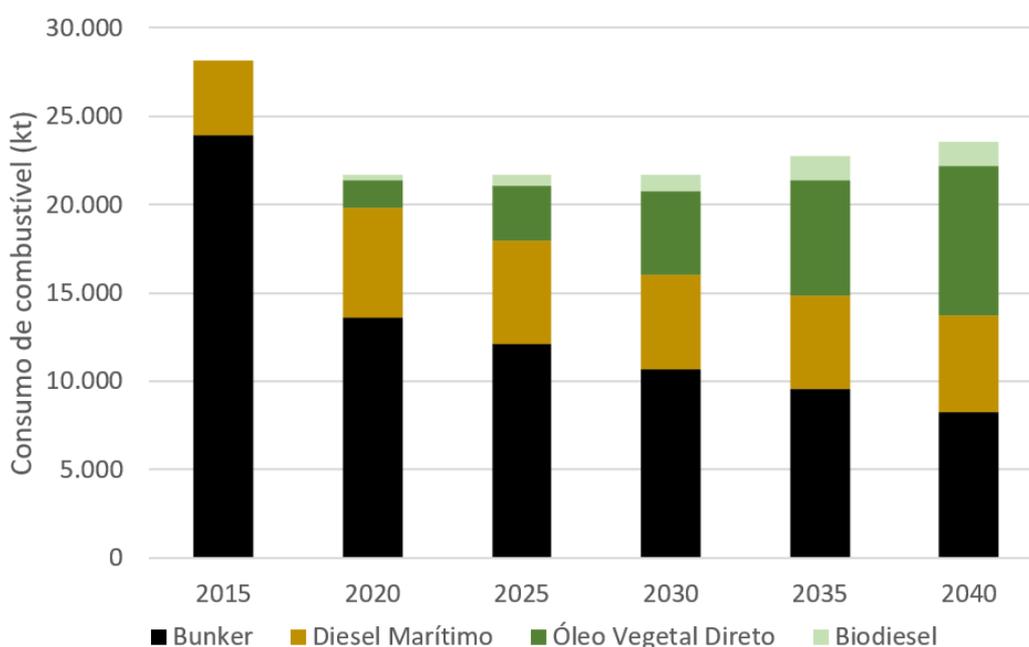


Figura 5.27: Consumo de combustíveis - cenário 7

Fonte: Elaboração própria

A redução vertiginosa das emissões de CO₂ entre 2015 e 2020 é sustentada em longo prazo pela crescente parcela de navios utilizando óleo vegetal direto em motores principais. Isso faz com que as emissões totais caiam continuamente, atingindo 43 Mt em 2040 (redução de 56% em relação ao cenário de referência).

Curiosamente, neste cenário, a intensa mitigação das emissões provenientes de motores principais faz com que o CO₂ emitido por motores auxiliares tome uma proporção muito grande, respondendo por quase 50% das emissões em 2040.

⁴Além da estratégia de eficiência energética ligada ao EEDI, presente também no cenário de referência.

⁵Evolução da frota idêntica à do cenário 4.

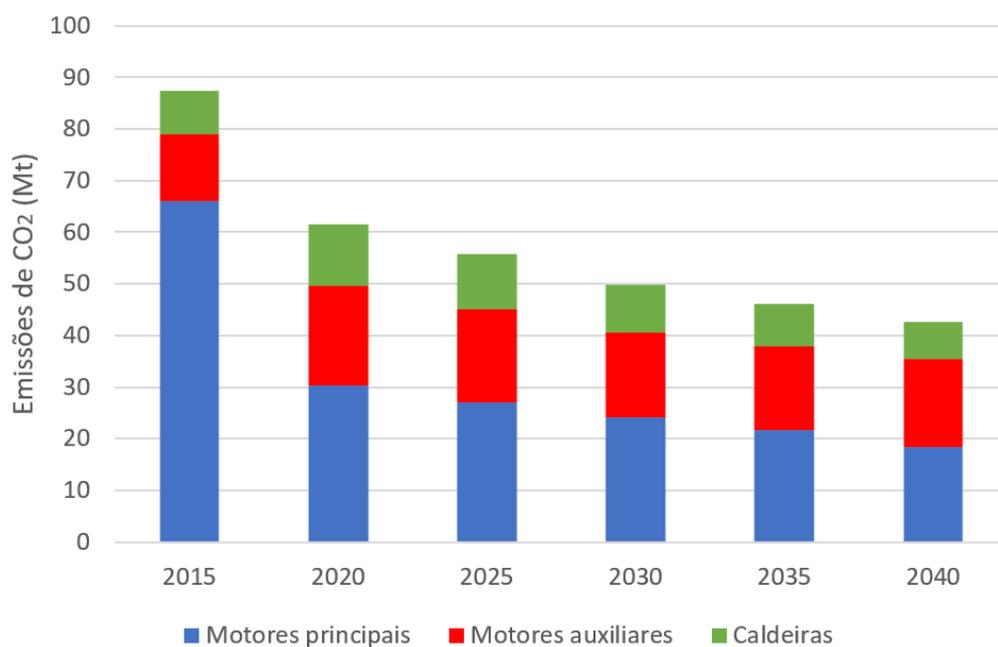


Figura 5.28: Emissões de CO₂ - cenário 7
Fonte: Elaboração própria

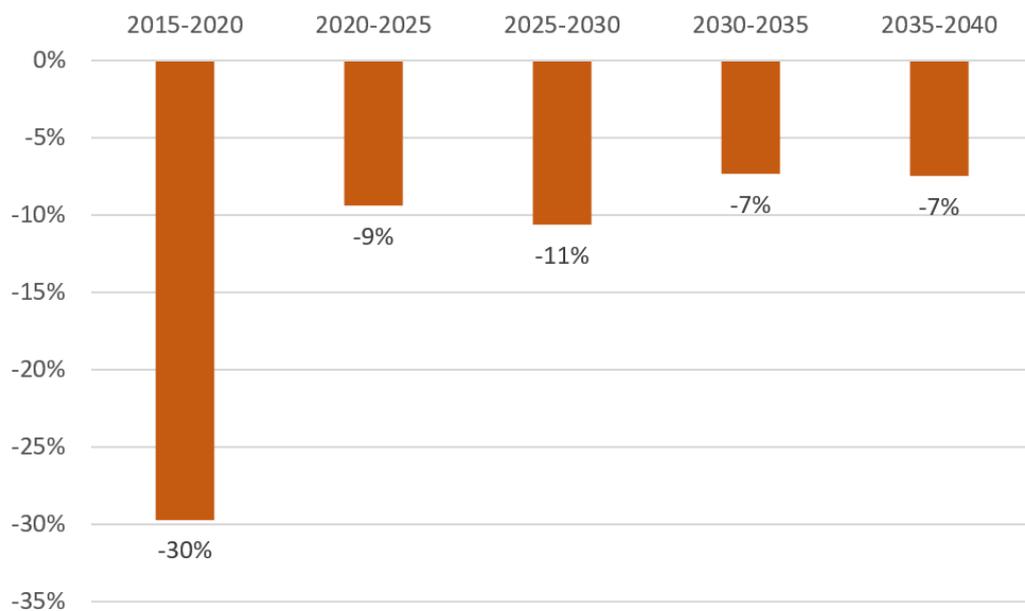


Figura 5.29: Crescimento percentual das emissões por período - cenário 7
Fonte: Elaboração própria

5.3 Emissões por origem e destino

A alocação das emissões de CO₂ do transporte marítimo internacional é uma das questões mais problemáticas envolvendo o assunto [146], estando inclusive na origem do fato de o setor não ter sido incluído no Acordo de Paris [147] ou em qualquer outro acordo climático envolvendo países.

A figura 5.30 mostra a evolução do perfil de emissões de CO₂ por região de origem dos navios, para o caso do cenário de referência⁶. Conforme explicado na seção 4.1, para cada país importador, considerou-se mantida a proporção de petróleo proveniente de cada exportador. Dessa forma, as emissões por região mantiveram-se aproximadamente constantes entre 2015 e 2040, sendo as rotas com origem no Oriente Médio responsáveis por aproximadamente 45% do CO₂ emitido. Note-se que, apesar da ligeira queda no valor absoluto das emissões da região (de 45 MtCO₂/ano para 43 MtCO₂/ano), houve um substancial crescimento de seu fluxo de petróleo (de 662 Mt/ano para 1.072 Mt/ano). Esse aparente paradoxo é explicado pelo relevante ganho de eficiência verificado no cenário de referência.

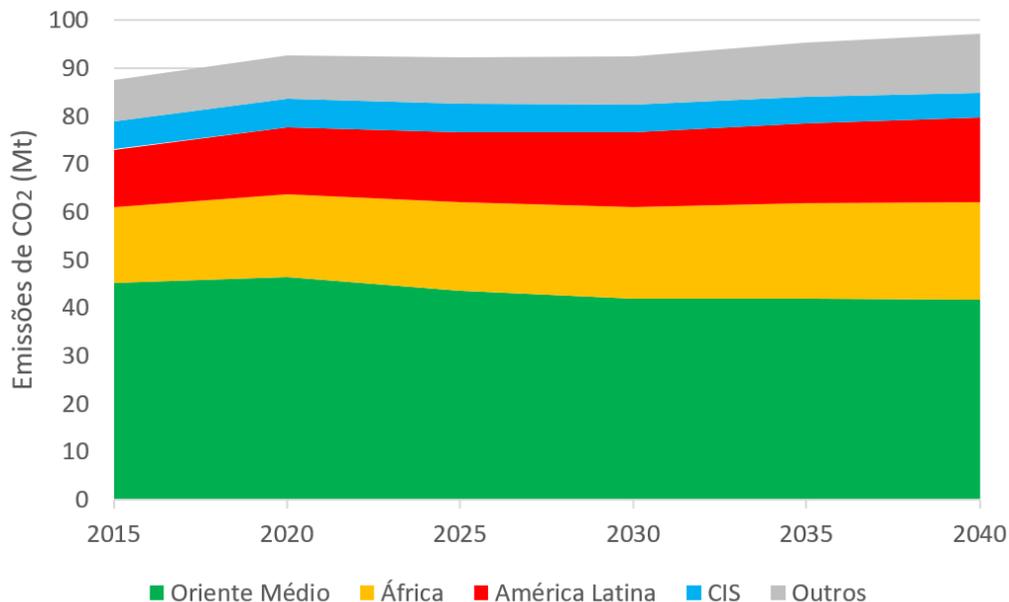


Figura 5.30: Emissões de CO₂ por região de origem (cenário 1)

Fonte: Elaboração própria

Examinando-se as emissões de CO₂ sob o prisma das regiões de destino das rotas (figura 5.31), percebe-se uma mudança significativa em longo prazo.

⁶Nos demais cenários, o perfil dos gráficos é bastante semelhante a este caso, já que se considera uma aplicação de medidas mitigadoras em âmbito global.

Em 2015, apesar de metade das emissões provir de rotas tendo o Extremo Oriente como destino, as participações de Estados Unidos e Europa são também consideráveis (11% e 22%, respectivamente). Rotas destinadas à Índia, por sua vez, são responsáveis por apenas 8% das emissões.

Ao longo dos 25 anos seguintes, a participação europeia cai a 13%, enquanto as emissões americanas desaparecem por conta de os EUA se tornarem exportadores líquidos de petróleo. A drástica redução do CO₂ emitido nas rotas chegando ao Atlântico Norte é compensada pelas demandas continuamente crescentes da China e da Índia. Assim, em 2040, rotas cujo destino são o Extremo Oriente ou o subcontinente indiano respondem por quase 75% das emissões de GEE do transporte marítimo de petróleo bruto.

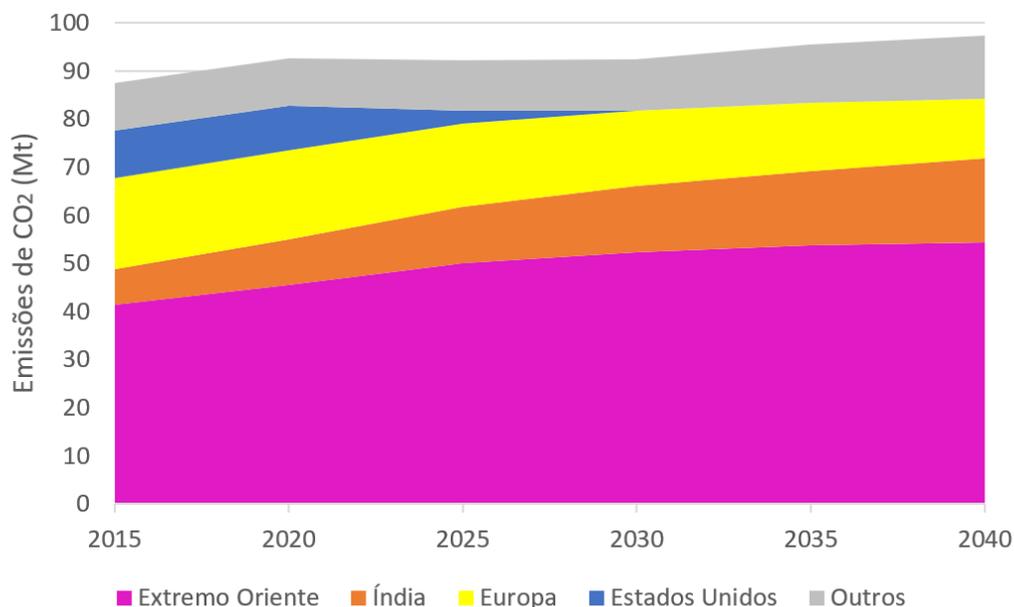


Figura 5.31: Emissões de CO₂ por região de destino (cenário 1)

Fonte: Elaboração própria

Cabe ressaltar que, do ponto de vista dos diferentes mecanismos de alocação de emissões que podem ser utilizados para a aplicação de MBMs, por exemplo, origem e destino não são as únicas informações relevante. De acordo com a IMO, a diferenciação dos navios pode ocorrer [148]

- por bandeira;
- por país de domicílio do construtor do navio;
- por rota;
- por destino final do navio.

5.4 Efetividade da política de eficiência da IMO

A figura 5.6 indica que existe um ganho significativo a partir da imposição de metas de eficiência energética pela IMO: enquanto no cenário de referência (C1), cujas hipóteses incluem a obrigatoriedade de *compliance* com o EEDI, as emissões de CO₂ chegam a 97 Mt/ano em 2040, no cenário contrafactual (C2), o número é igual a 121 Mt/ano. A redução das emissões acumuladas correspondente é de 10%. Tal resultado deve, contudo, ser analisado com cautela.

A princípio, no cenário 1, verifica-se um expressivo decréscimo das emissões de CO₂ em relação ao cenário contrafactual, ou seja, *a priori*, seria possível afirmar que a política de eficiência energética da IMO tende a contribuir fortemente para a redução do carbono emitido pelo transporte marítimo. Cabe, no entanto, uma discussão a respeito dos valores de referência usados na elaboração do EEDI.

Conforme explicado na seção 3.1, o valor do EEDI requerido torna-se gradativamente menor com o passar do tempo. Isso significa que, em relação a uma certa linha de referência, os novos navios deverão tornar-se progressivamente mais eficientes, emitindo, portanto, menos gases de efeito estufa.

Ocorre que a linha de referência empregada para o cálculo do EEDI requerido é considerada defasada. O índice baseia-se no consumo específico médio de navios construídos entre 1999 e 2009, igual a 190 g/kWh⁷ [26]. Se, por um lado, tal valor constitui uma boa estimativa para o SFC da frota existente em 2015 (composta inclusive por embarcações ainda mais antigas), por outro, o número é uma linha de base irreal em comparação com o consumo específico médio de navios mais novos: estima-se que o SFC de motores principais de embarcações de grande porte construídas entre 2009 e 2014 esteja entre 165 e 185 g/kWh [132][48], *i.e.*, abaixo da linha de referência do EEDI.

Uma publicação recente concluiu que, na verdade, o padrão de eficiência imposto pela IMO a título de mitigação das emissões de CO₂ é inadequado para propiciar ganhos reais de eficiência energética ou favorecer a penetração de novas tecnologias no setor naval, justamente por basear-se em metas pouco ambiciosas [149]. De acordo com a análise estatística desenvolvida no estudo, 26% dos petroleiros construídos entre 2013 e 2017 já se adequam ao padrão de EEDI requerido na última fase de implementação do índice (2025 em diante). Para outros tipos de embarcação, como porta-contêineres e navios de carga geral, os números são ainda maiores (figura 5.32) [149].

Nesse sentido, pode-se dizer que o cenário contrafactual desenvolvido nesta dissertação foi extremamente conservador ao considerar a continuidade de um consumo específico médio bastante elevado (190 g/kWh), baseando-se na referência do EEDI.

⁷Motores principais.

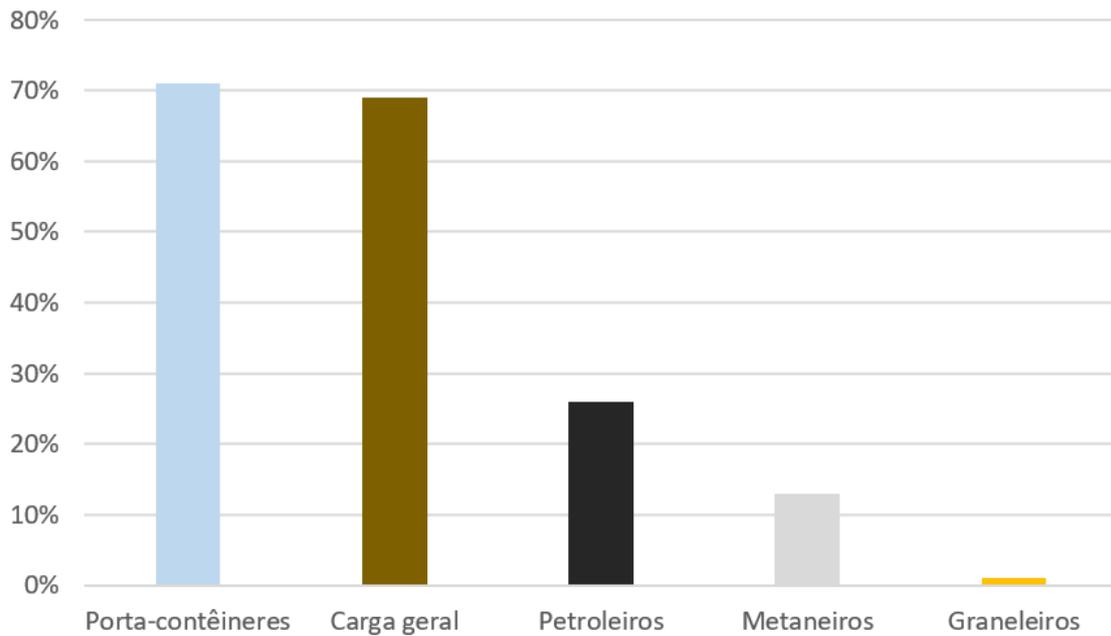


Figura 5.32: Percentual de navios *compliant*s com EEDI-2025 por categoria
Fonte: Adaptado de [149]

Além disso, é possível afirmar que, se a observância dos requisitos do EEDI não fosse obrigatória, o cenário de referência desenvolvido neste trabalho não sofreria alterações significativas. Como foi aqui explicado, a redução do consumo energético dos grandes navios mercantes verificada nos últimos anos parece relacionar-se muito mais a uma evolução tecnológica natural do que às metas estabelecidas pela Organização Marítima Internacional. Assim, a política de eficiência energética elaborada pela IMO tende a ter uma influência relativamente pequena na trajetória de emissões do cenário 1.

As críticas à postura da IMO diante da necessidade de mitigação das emissões de GEE não se limitam à fragilidade do EEDI. A agência é acusada de sofrer uma influência excessiva do *lobby* da indústria naval, o que tem prejudicado os esforços no sentido de estabelecer uma estratégia global para o setor [150]. De acordo com um recente relatório sobre a interferência corporativa na agência da ONU, o progresso dos esforços de combate às mudanças climáticas no âmbito do transporte marítimo internacional foi completamente paralisado por poderosas associações, lideradas pela ICS [151].

5.5 Regimes de velocidade

Na figura 5.33, mostra-se a evolução do tamanho da frota de navios-tanque de petróleo bruto para cada regime de velocidade estudado. Em cenários em que se considera a continuidade dos padrões usuais, verifica-se um aumento gradual do número de petroleiros: de 1.956 em 2015, passa-se a 2.242 em 2030 (aumento de 15%) e a 2.642 em 2040 (aumento de 35%).

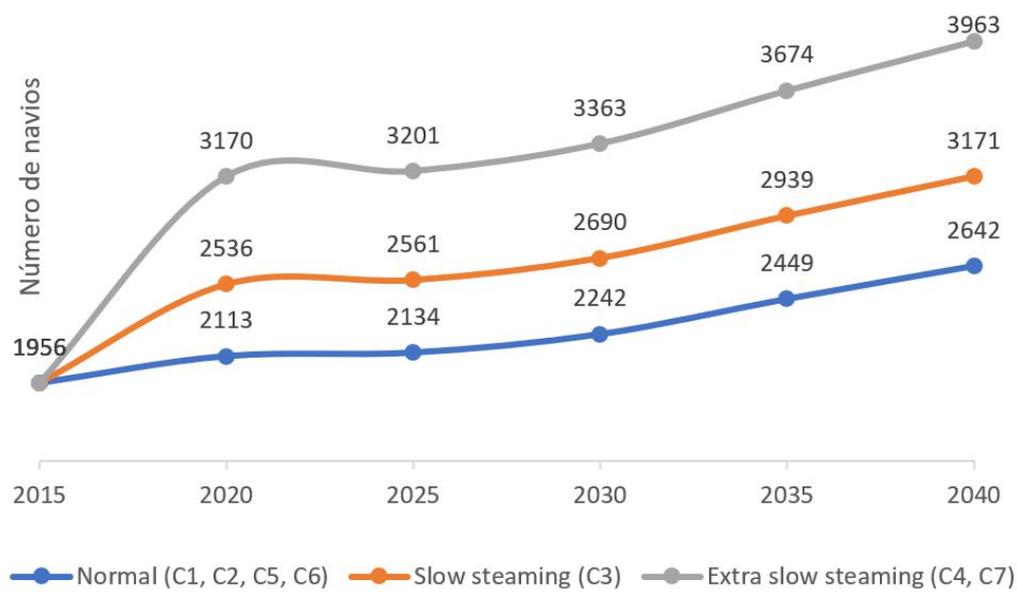


Figura 5.33: Evolução da frota de petroleiros de acordo com regime de velocidade
Fonte: Elaboração própria

Em um cenário de *slow steaming* moderado, constata-se um aumento um pouco mais acentuado da demanda por navios-tanque: em 2030, têm-se 2.690 embarcações e, em 2040, 3.171 embarcações (crescimentos de 38% e 62% em relação a 2015, respectivamente).

A expansão da frota é ainda mais drástica em cenários de *extra slow steaming*: verifica-se um aumento de 72% entre 2015 e 2030, ano em que são necessários 3.363 petroleiros de óleo cru. Em 2040, a frota é composta por 3.963 embarcações, 103% a mais que em 2015.

Presumivelmente, em cenários de *slow/extra slow steaming*, o consumo de diesel marítimo aumenta substancialmente (figuras 5.15, 5.18 e 5.27). Isso acontece justamente pela grande quantidade de navios necessária para atender à mesma demanda de petróleo dos demais cenários com um perfil de velocidades mais baixas. Cabe lembrar que, de acordo com as hipóteses do modelo, a demanda por potência auxiliar independe da velocidade do navio.

Dessa forma, em cenários em que há redução de velocidade, as emissões provenientes de motores auxiliares ganham importância, respondendo por uma parcela maior do CO₂ total emitido. Tal dinâmica é ilustrada pela figura 5.34, em que se mostram as proporções relativas a cada fonte de emissão em 2040 para os sete cenários. Enquanto nos cenários de manutenção do padrão usual de velocidade o CO₂ advindo de motores auxiliares corresponde a aproximadamente 17% do total, nos cenários de *slow/extra slow steaming*, a participação dos sistemas auxiliares fica entre 20 e 40% das emissões anuais totais.

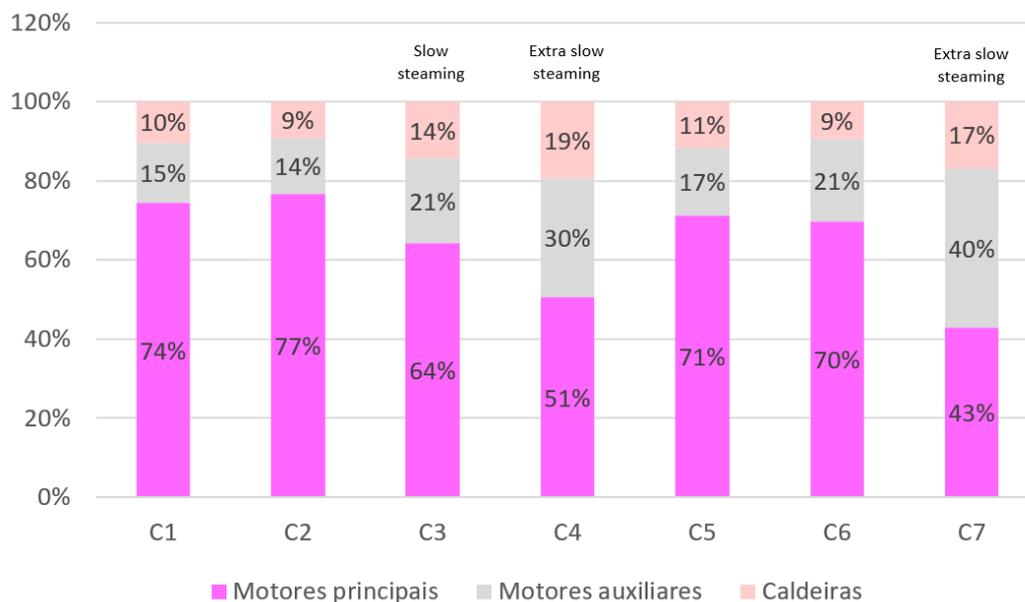


Figura 5.34: Repartição das emissões por fonte em 2040

Fonte: Elaboração própria

Note-se que a mesma lógica se aplica às emissões advindas de caldeiras: embora isto não fique claro nos gráficos das figuras 5.15, 5.18 e 5.27 pelo fato de não haver distinção entre HFO consumido em motores principais e HFO consumido em caldeiras, a modelagem desse tipo de emissões é idêntica àquela dos sistemas auxiliares. Conforme ilustra a figura 5.34, o peso das emissões provenientes de caldeiras aumenta bastante em cenários de baixa velocidade, de maneira similar ao que ocorre com os motores auxiliares. Detendo uma parcela de aproximadamente 10% em cenários de alta velocidade, as caldeiras passam a contribuir com 15 a 20% do CO₂ emitido em cenários de menor velocidade.

De maneira geral, conclui-se que o *slow steaming* e o *extra slow steaming* contribuem para a redução do percentual de emissões atribuído aos motores principais por dois motivos distintos:

- por um lado, enquanto a redução da velocidade tem um impacto direto sobre o consumo de combustível associado à propulsão, tal medida não tem efeitos imediatos sobre as demais demandas energéticas dos navios, o que faz com que a tendência seja a diminuição da parcela de emissões atribuída a motores principais;
- soma-se a isso o fato de que a redução das velocidades praticadas exige um crescimento mais veloz da frota, o que multiplica a demanda de energia de sistemas auxiliares e caldeiras.

Tendo em vista o fato de que o *slow steaming* contribui apenas para a mitigação das emissões de motor principal, colaborando inclusive para o aumento das emissões dos demais sistemas de energia das embarcações, caberia questionar a efetividade dessa medida mitigadora: em longo prazo, dado o grande número de navios necessários para o atendimento à demanda por petróleo, a adoção de um regime de velocidades mais baixas faria sentido do ponto de vista do CO₂ emitido?

Os resultados dos cenários 3 e 4 mostram que sim. Pelo fato de a principal componente da resistência ao avanço de petroleiros ser proporcional ao cubo de sua velocidade, a magnitude da economia de bunker em motores principais proporcionada por viagens mais lentas tende a ser muito superior à magnitude do incremento na demanda por diesel marítimo decorrente da necessidade de se ter uma frota mais numerosa. Como os dois combustíveis têm fatores de emissão praticamente iguais, essa dinâmica se reproduz no que se refere ao CO₂ emitido: a drástica redução das emissões de motores principais sobrecompensa o aumento das emissões dos motores auxiliares e das caldeiras.

Além disso, cabe lembrar que o cálculo do aumento do número de navios provocado pela adoção de *slow/extra slow steaming* foi realizado de maneira bastante conservadora. Conforme explicado na subseção 4.5.2, a equação 4.5.2 fornece uma primeira estimativa da expansão da frota sob condições de velocidade reduzida, mas desconsidera, por exemplo, a existência de capacidade ociosa ou o fato de que o tempo gasto por um navio durante o carregamento/descarregamento independe da velocidade praticada durante o período em curso. É provável, portanto, que o real aumento induzido pela navegação em baixas velocidades seja consideravelmente inferior àquele previsto pelo modelo usado neste trabalho, o que torna o saldo de emissões do *slow steaming* ainda mais positivo.

De fato, a redução das velocidades praticadas pelos petroleiros (e por outros grandes navios, em geral) é uma medida que, apesar de incremental, reserva um elevado potencial de mitigação da emissão de gases de efeito estufa. Atualmente, o *slow steaming* tem motivação predominantemente econômica. Para que se torne uma medida sustentável em longo prazo, é preciso que haja regulação.

5.6 Disponibilidade de combustíveis alternativos

5.6.1 Gás natural liquefeito (GNL)

A figura 5.35 mostra o crescimento da demanda por GNL em petroleiros de óleo cru no caso de um cenário de transição para esse combustível (C5). Partindo de 974 kt em 2020, o consumo chega a 3.221 kt em 2030 e a 9.435 kt em 2040.

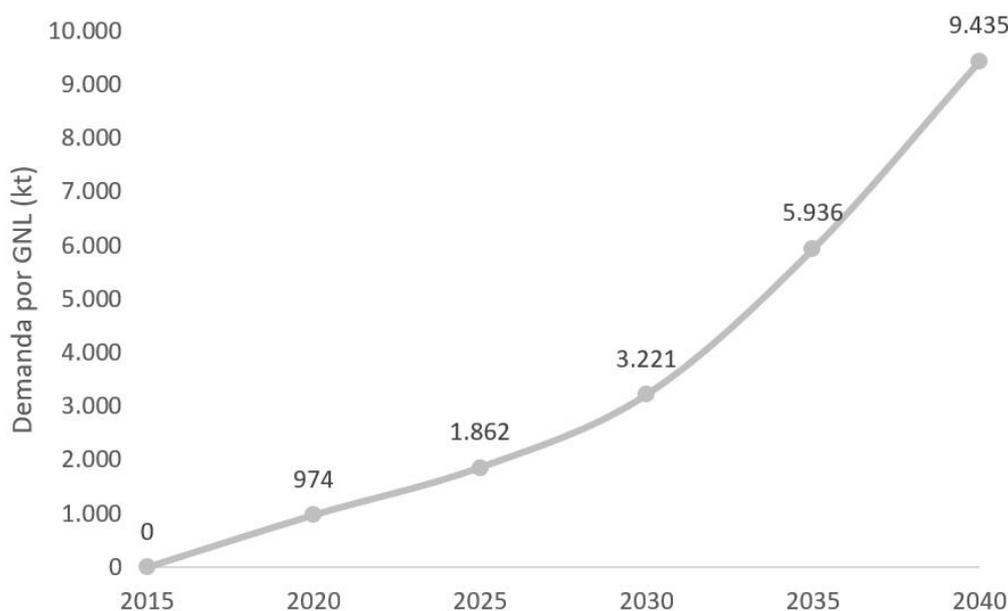


Figura 5.35: Demanda por GNL no cenário 5

Fonte: Elaboração própria

Mesmo a demanda de quase 10 Mt/ano em 2040 representa apenas um pequeno percentual (0,3%) da atual produção mundial de gás natural, que é aproximadamente igual a 2,9 Gt. Fica claro, portanto, que a disponibilidade de gás não seria, ao menos em curto prazo, um problema para a utilização do combustível em motores principais de navios, sobretudo em um contexto de expansão da indústria do gás natural.

Além disso, conforme mostrado na figura 5.36, os maiores produtores de gás são justamente países envolvidos, seja como exportadores ou como importadores, nos principais movimentos inter-regionais de petróleo: Rússia e Oriente Médio, dois dos principais polos de exportação de óleo cru, são também grandes produtores de gás natural; os Estados Unidos, que importam e exportam petróleo em quantidades relevantes, têm a maior produção anual do recurso; a China, cujas importações devem experimentar grande crescimento nas próximas décadas, também possui uma produção considerável de gás.

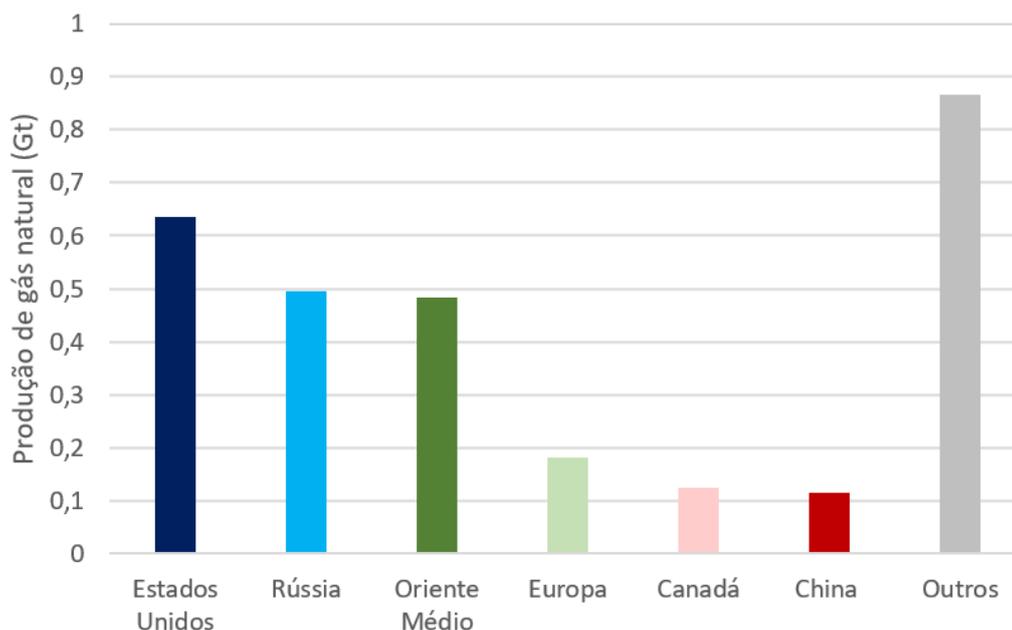


Figura 5.36: Produção de gás natural por região em 2016
Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [152]

No entanto, o ponto crítico para o aproveitamento desse recurso é a existência de uma infraestrutura de conversão do gás para estado líquido. A produção de GNL ocorre em terminais de liquefação, em que o gás é resfriado até baixíssimas temperaturas para ser estocado e, posteriormente, transportado por navios metaneiros⁸ [153].

Apesar de a liquefação do gás ser um processo antigo, o crescimento do interesse pelo GNL é relativamente recente [153] e, assim, as plantas de conversão não são tão numerosas. Na figura 5.37, mostram-se as unidades existentes no mundo em janeiro de 2017 [154]: cinco países⁹ concentram mais de 60% da capacidade de conversão (figura 5.38), sendo que algumas nações importantes, como Brasil, China e Índia, não possuem nenhuma planta.

A atual capacidade global de liquefação gira em torno de 340 milhões de toneladas por ano (MTPA). Esse valor corresponde a aproximadamente 12% da produção mundial de gás. Caso o GNL seja realmente adotado pela indústria naval, um acréscimo nessa capacidade será necessário.

⁸Por isso, em geral, os terminais de GNL situam-se em regiões portuárias.

⁹Austrália, Catar, Argélia, Nigéria, Malásia



Figura 5.37: Plantas de liquefação de gás no mundo
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [154]

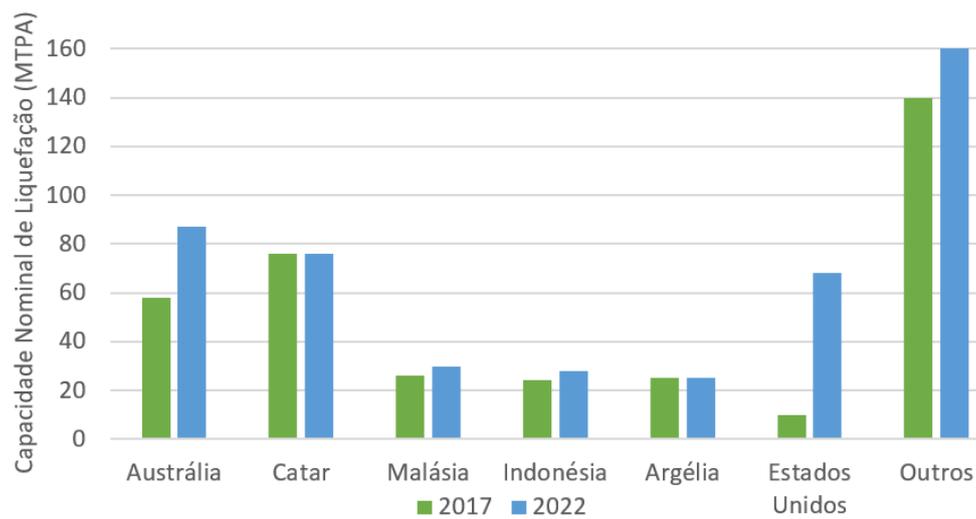


Figura 5.38: Capacidade de liquefação por país
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [154]

Dessa forma, do ponto de vista de disponibilidade do combustível, uma transição gradual da propulsão dos petroleiros do *bunker* para o GNL parece perfeitamente viável, restando como desafio a adaptação e o rearranjo da cadeia do gás natural para o abastecimento de navios.

De fato, com o preço do bunker aumentando continuamente e com as novas regulamentações a respeito das emissões de enxofre em certas áreas, o uso do GNL na propulsão naval vem se tornando uma realidade, não apenas no âmbito do transporte de petróleo e derivados [57], como também na categoria de porta-contêineres e em outros tipos de embarcação [155].

Uma ressalva importante em relação à utilização do GNL no setor marítimo diz respeito à ocupação de espaço nas embarcações. De maneira geral, navios mercantes são concebidos de maneira a otimizar o volume destinado à carga. Ocorre que o GNL possui densidade mais baixa, demandando portanto tanques de combustível maiores do que aqueles convencionalmente utilizados para o bunker. Em base energia, o espaço ocupado pelo gás liquefeito é aproximadamente 70% maior do que o espaço ocupado pelo HFO. Assim, navios propelidos a GNL tendem a ter menos espaço disponível para a carga, o que pode ser um inconveniente. Essa limitação, que pode acarretar um aumento do número de navios, foi desconsiderada na modelagem desenvolvida nesta dissertação.

Outro aspecto digno de consideração são as emissões indiretas potencialmente envolvidas na cadeia logística do GNL: se, por um lado, a contribuição do gás para a redução da poluição local é uma certeza, por outro, seu papel na esfera da mitigação das mudanças climáticas é ambíguo. A redução das emissões diretas é garantida pelo menor fator de emissão do gás. No entanto, a possibilidade de vazamento de metano ao longo dos sistemas de produção e distribuição do combustível faz com que haja um risco de grande crescimento das emissões indiretas, pois o CH_4 produz um forçamento radiativo muito superior ao do gás carbônico. [156].

5.6.2 Biocombustíveis

Na figura 5.39, vê-se o crescimento da demanda por óleo vegetal direto e por biodiesel no cenário de transição para biocombustíveis (C6). Em 2040, o consumo de SVO atinge 13.600 kt/ano enquanto o uso de biodiesel chega a 900 kt/ano.

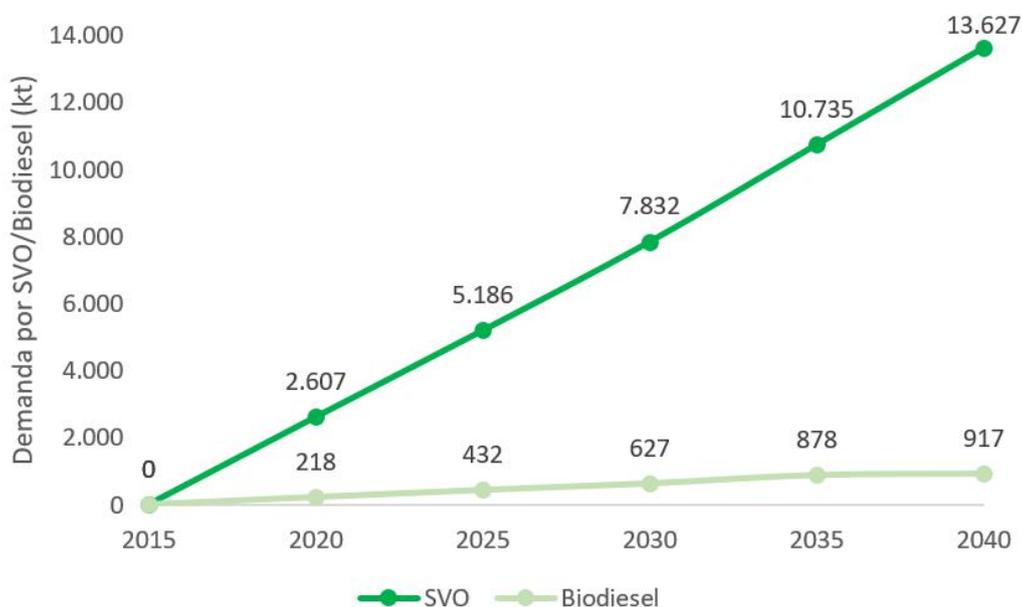


Figura 5.39: Demanda por SVO e biodiesel no cenário 6

Fonte: Elaboração própria

Na figura 5.40, mostra-se a produção mundial de óleo vegetal por tipo no ciclo 2016-17. Soja, colza e palma se destacam em termos quantitativos: juntas, as três culturas respondem por quase 80% do consumo mundial de 186.000 kt. Cabe ressaltar, no entanto, que boa parte desse montante destina-se ao uso alimentar (no caso da palma, por exemplo, 90%) [157].

Considerando-se um percentual semelhante para as demais oleaginosas, pode-se estimar que a produção de óleos vegetais voltada para o uso energético esteja em torno de 20.000 kt. Ao contrário do que se constatou no caso do gás natural, a demanda por SVO calculada no cenário 6 para o ano de 2020 é uma fração significativa¹⁰ da produção mundial atual (13%), o que revela a reduzida escala industrial desse tipo de biocombustível.

Cabe lembrar que o biodiesel é produzido a partir da transesterificação de óleos vegetais e, assim, a demanda adicional de motores auxiliares também seria suprida a partir desses óleos. Contudo, nesse caso, os números são bem mais discretos, atingindo a marca de 900 kt em 2040. Ainda assim, essa quantidade representa 5% da produção atual de biodiesel, cuja repartição por país é mostrada na figura 5.41.

¹⁰Considerando-se a produção voltada para energia, a fração é muito maior.

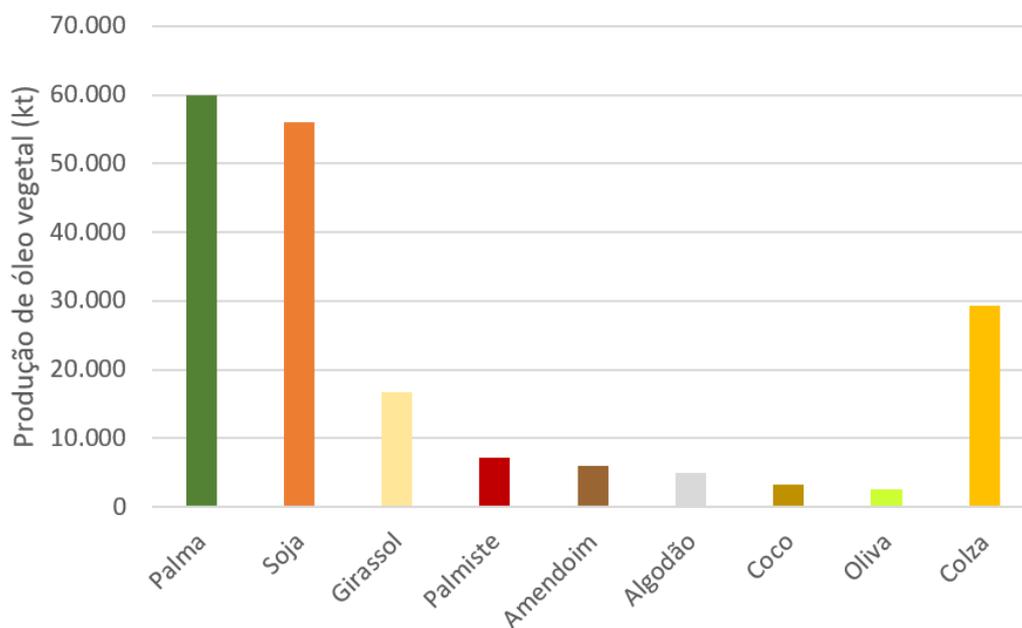


Figura 5.40: Produção mundial de óleo vegetal por tipo no ciclo 2016-2017
Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [157]

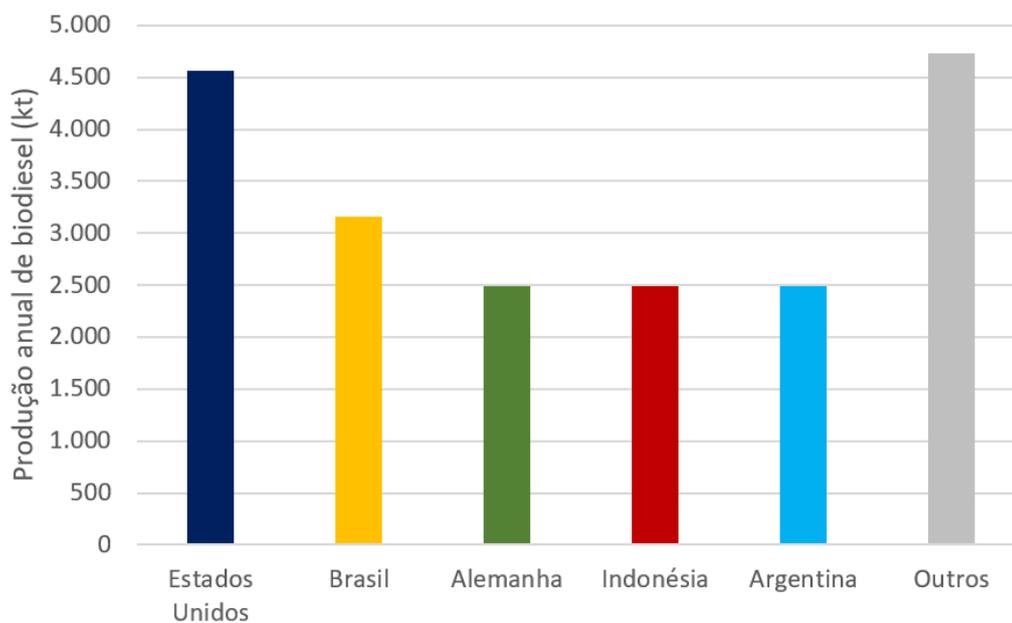


Figura 5.41: Produção de biodiesel por país em 2016
Fonte: Elaboração própria com base nos dados de [158]

Note-se ainda que a produção de óleos vegetais é restrita a alguns poucos países, com destaque para Brasil e Estados Unidos. Na construção do cenário de transição para biocombustíveis, considerou-se que a participação do SVO é a mesma em todas as rotas, o que pode revelar-se inverossímil. Rotas como Brasil-EUA ou Brasil-Sudeste Asiático¹¹ têm um potencial muito maior de aderirem à utilização do SVO e do biodiesel em comparação, por exemplo, com as rotas que partem do Oriente Médio, onde não há produção significativa desses óleos.

Assim, conclui-se que a viabilidade dos cenários 6 e 7 é fortemente comprometida pela disponibilidade dos biocombustíveis envolvidos. Tendo em vista a pequena proporção em que ocorre a produção de óleo vegetal direto e de biodiesel atualmente, seriam necessárias políticas extremamente contundentes para que, por exemplo, 20% dos petroleiros de grande porte utilizassem SVO em seus motores principais em 2025.

Nesse sentido, o setor de biocombustíveis no contexto marítimo enfrenta o dilema do ovo e da galinha, pois, assim como a disponibilidade reduzida desencoraja a utilização dos óleos vegetais, a ausência de navios funcionando à base de SVO e biodiesel não estimula a expansão da produção.

Vale destacar que o biodiesel possui uma vantagem competitiva em relação ao óleo vegetal direto: por adequar-se a um processo de *blending* com o diesel convencional, o combustível pode entrar de maneira gradual no setor marítimo, com sua participação aumentando ao longo dos anos.

Conforme discutido na seção anteriormente, a rota de substituição do bunker por SVO não é a única possibilidade. Uma alternativa que não foi contemplada quantitativamente por este trabalho é a gradual transição do bunker para MGO em motores principais, que permitiria a utilização de *blends* de biodiesel não apenas nos motores auxiliares, mas também em sistemas de propulsão [159].

Uma outra possibilidade seria uma transição para os biocombustíveis subsequente à transição que atualmente se anuncia para o gás natural: alguns autores apontam que uma rota interessante para o setor marítimo é a gradual substituição, em médio prazo, do bunker pelo GNL, seguida, em longo prazo, por uma crescente participação do bio-GNL em *blends* com GNL convencional [159].

¹¹Pela presença da Indonésia, que se destaca pela produção de óleo de palma.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Principais conclusões

Esta dissertação teve por objetivo examinar, qualitativa e quantitativamente¹, o potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa do setor marítimo internacional. Para tanto, foi realizada uma revisão teórica (capítulos 2 e 3), seguida por uma análise específica das emissões de navios petroleiros, baseada na construção de cenários (capítulos 4 e 5).

O capítulo 2 consistiu em uma ampla contextualização do problema. Ressaltou-se, antes de tudo, o papel dos transportes no aquecimento global antrópico, decorrente do elevado grau de dependência desse setor em relação aos combustíveis fósseis, especialmente aos derivados de petróleo, como diesel, gasolina e querosene de aviação.

Em seguida, focalizou-se o transporte marítimo: após uma breve discussão a respeito de seu proeminente papel econômico, constatou-se seu alinhamento com o resto do setor de transportes em termos energéticos: na atual configuração, 100% da energia demandada por navios mercantes é atendida por produtos do óleo cru, mais precisamente, por formulações advindas de frações pesadas e resíduos da destilação atmosférica. Diversos tipos de combustíveis marítimos são empregados em grandes embarcações, mas é possível distinguir duas categorias bem definidas, quais sejam, o bunker ou HFO, que alimenta sistemas de propulsão² e o diesel marítimo ou MGO, que fornece energia para geração de eletricidade.

Estabelece-se, ainda no capítulo 2, uma comparação entre a eficiência de carbono do modal hidroviário com a de outros meios de movimentação de carga e passageiros: verifica-se que o transporte marítimo é extremamente eficiente em termos de

¹A avaliação quantitativa restringiu-se ao segmento de navios petroleiros, *i.e.*, não se avaliou, em termos quantitativos, o potencial de mitigação das emissões do TMI como um todo.

²O bunker também é usado para geração de calor (caldeiras auxiliares).

massa de CO₂ emitida por tonelada transportada, sendo a razão CO₂/tonelada especialmente pequena no caso de grandes navios cargueiros.

Ainda assim, a massa de CO₂ emitida anualmente pelo transporte marítimo global é bastante significativa (~ 2–3% do total global), sendo comparável às emissões anuais de países como Alemanha, Irã e Coreia do Sul. A situação é agravada pela perspectiva de aumento do nível de emissões do setor em curto e médio prazo: com efeito, o comércio marítimo internacional deve intensificar-se bastante nas próximas décadas, o que representa um desafio a mais do ponto de vista de mitigação nessa esfera.

Comentou-se, por fim, o papel dos petroleiros, classe de navios selecionada para o estudo quantitativo desenvolvido na dissertação, nas emissões do setor marítimo internacional. Ao lado de graneleiros, porta-contentores e outros tipos de navios-tanque, os petroleiros são uma das principais classes de embarcações mercantes do mundo, respondendo por pouco menos de 90 MtCO₂, isto é, por 10% da contribuição total do TMI.

Tendo-se exposto, no capítulo 2, a problemática que motivou a escrita de todo o trabalho, passou-se ao terceiro capítulo, cujo foco são as possíveis soluções para a questão apresentada.

No capítulo 3, avaliou-se, sob a perspectiva teórica, o panorama de mitigação: primeiramente, descreveu-se o estágio atual dos esforços de redução das emissões e, em seguida, elencaram-se as diferentes ações e mudanças estruturais que podem contribuir para que o transporte marítimo reduza seus níveis de poluição global.

Entre as ações já em curso, identificou-se a política obrigatória da IMO de *compliance* com o índice EEDI como o principal esforço mitigatório no âmbito do TMI. Tal política é, no entanto, limitada e pouco ambiciosa, refletindo, de certa forma, a postura negligente da agência internacional frente ao problema da mudanças climáticas.

No que concerne a outras possibilidades de mitigação, identificaram-se dois possíveis campos de trabalho, sendo um ligado a medidas incrementais (*slow steaming*) e o outro a medidas estruturais (transição para combustíveis de menor teor de carbono).

Ao se estudar o *slow steaming*, percebeu-se que, de fato, esta é uma prática que encerra um amplo potencial de redução das emissões de CO₂. Graças à relação aproximadamente cúbica entre a velocidade de um navio e a potência exigida de seu motor principal, reduções modestas de velocidade acarretam uma apreciável economia de combustível. Todavia, a adoção de um regime de velocidades mais baixas na navegação internacional envolve uma série de dimensões técnicas e comerciais, que também precisam ser apreciadas.

De modo geral, o *slow steaming* é praticado quando existe uma relação considerada interessante pelos armadores entre o preço do bunker e as taxas de frete, sendo, portanto, uma medida mitigadora cujo impacto é muito volúvel. Nesse sentido, o uso de medidas baseadas em mercado, tais como a imposição de uma taxa de carbono ao bunker, pode ser de grande valia. Ao acrescentar um custo carbono ao preço de combustíveis marítimos, uma MBM impulsionaria a prática do *slow steaming*, promovendo uma grande redução na demanda por HFO e, por conseguinte, uma expressiva redução das emissões de gases estufa.

No campo das medidas estruturais, concluiu-se que as grandes oportunidades de mitigação residem na possibilidade de uma transição do setor naval para combustíveis de menor teor de carbono, como GNL e biocombustíveis.

Discutir a utilização do gás natural em aplicações marítimas não é mera especulação: não apenas o GNL é considerado o combustível do futuro no setor, como já é utilizado em uns poucos navios. Na verdade, a motivação por trás do interesse da indústria naval pelo gás está mais ligada à poluição local do que à global: os derivados de petróleo convencionalmente usados na propulsão naval são ricos em enxofre e ao, serem queimados, emitem óxidos dessa substância, que são nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Recentemente, novas regulamentações têm sido aprovadas e, a partir de 2020, a máxima quantidade de enxofre permitida nos combustíveis marítimos será muito pequena. Nesse contexto de restrições, o GNL aparece como uma possível alternativa ao bunker: além de barato, o gás não possui heteroátomos em sua composição, não contribuindo, portanto, para a poluição local.

Assim sendo, o fato de o GNL contar com um menor teor de carbono surge como um co-benefício. Por certo, o combustível possui um fator de emissão menor do que o do bunker (aproximadamente 25% em base energia). No entanto, da mesma forma que os derivados de petróleo, o gás natural é um recurso fóssil e, assim, o potencial de mitigação das emissões de CO₂ oferecido por essa alternativa energética é limitado, sobretudo quando se levam em conta as emissões indiretas de GEE relacionadas à cadeia logística do combustível, que podem ser muito significativas por conta do vazamento de metano, gás estufa com forçamento radiativo muito superior ao do CO₂.

Nesse sentido, pode-se dizer que, sob a perspectiva das mudanças climáticas, uma opção mais interessante para o setor marítimo seria voltar-se para o uso de biocombustíveis. Ainda que sua utilização atual esteja muito abaixo dos níveis desejados, os biocombustíveis constituem um pilar fundamental da transição para um setor de transportes de baixo carbono, sobretudo no que se refere à movimentação de cargas. A introdução dessa fonte de energia no setor naval encontra-se em estágio absolutamente incipiente: pouco se discute, na prática, o seu uso em grandes navios mercantes.

No entanto, o potencial de utilização de biocombustíveis no transporte marítimo é grande. Concluiu-se que, do ponto de vista técnico, a substituição do bunker por óleo vegetal direto (SVO) e a adição de biodiesel ao MGO em pequenos *blends* constituem as mais promissoras rotas para a introdução de biocombustíveis no setor.

De posse do referencial teórico estabelecido nos capítulos 2 e 3, passou-se à etapa de avaliação quantitativa do potencial de mitigação das emissões do transporte marítimo internacional, descrita no capítulo 4. Diante de restrições de tempo, optou-se por trabalhar com apenas um tipo de mercadoria e, portanto, com apenas um tipo de embarcação. Conforme mencionado anteriormente, a escolha do petróleo deu-se principalmente pelo fato de tal *commodity* conectar-se explicitamente ao tema da energia.

Desse modo, é importante frisar que o objetivo do capítulo 4 não foi apenas a utilização de um modelo *bottom-up* para determinação das possíveis trajetórias das emissões dos petroleiros, mas, sobretudo, a proposição de uma metodologia de criação de cenários para qualquer produto comercializado por via marítima.

O primeiro passo dessa metodologia é o único restrito ao petróleo, cuja projeção de *trade* baseou-se num cenário de demandas líquidas, gerado a partir de um panorama de longo prazo de consumo e produção de diferentes regiões do mundo.

Num segundo momento, procurou-se, a partir da referida projeção, transformar os fluxos inter-regionais de petróleo em rotas marítimas específicas. Do mapeamento, resultaram 37 rotas reais e duas fictícias (que procuram representar as movimentações residuais de óleo cru), as quais foram caracterizadas com portos, distâncias de referência e navios comumente empregados.

O terceiro passo consistiu em estabelecer um modelo de sucateamento e renovação da frota de navios. Nessa etapa, baseamo-nos em curvas de sobrevivência e em uma hipótese de proporcionalidade entre o aumento do comércio e o número de navios para calcular a quantidade total de embarcações ano a ano, discriminando-as por faixa etária.

O coração da metodologia é a criação de um cenário de referência, quarto passo do procedimento: a partir de equações simplificadas de resistência ao avanço e de dados sobre eficiência, consumo específico e fatores de emissão e assumindo-se um cenário econômico e tecnológico de *Business as usual*, constrói-se uma projeção do consumo de combustível e das emissões de CO₂ associadas à movimentação hidroviária global de petróleo.

O quinto e último passo é a derivação, por meio de uma série de modificações em parâmetros do modelo *bottom-up*, de seis cenários alternativos a essa referência BAU, sendo um deles contrafactual e estando os demais relacionados às diferentes opções de mitigação levantadas no capítulo 3.

No capítulo 5, apresentam-se os principais resultados da aplicação da metodologia desenvolvida ao comércio de petróleo.

Primeiramente, mostram-se os resultados da projeção de *trade* de petróleo. Tecem-se comentários sobre o rearranjo dos fluxos de óleo entre as diversas regiões do mundo e chama-se a atenção para o papel central de dois gargalos do transporte da *commodity*, os estreitos de Ormuz e Málaga.

Posteriormente, apresentam-se os principais resultados quantitativos deste trabalho, os cenários de consumo de combustíveis e emissões de CO₂ do comércio marítimo de petróleo nos sete cenários propostos:

- no cenário de referência (C1), ocorre um aumento suave e constante das emissões de petroleiros, que passam de 87 MtCO₂/ano (2015) para 95 MtCO₂/ano (2040);
- no cenário contrafactual (eficiência congelada, C2), as emissões aumentam mais rapidamente, atingindo 112 MtCO₂/ano em 2040 (18% a mais que no cenário de referência);
- no cenário de *slow steaming* (C3), há ligeira diminuição das emissões nos primeiros anos, seguida por um novo aumento a partir de 2030. Em 2040, as emissões são de 83 MtCO₂/ano (8% a menos que no cenário de referência);
- no cenário de *extra slow steaming* (C4), ocorre uma diminuição mais significativa das emissões nos primeiros anos, seguida, ainda assim, por um aumento a partir de 2030. Em 2040, as emissões são de 73 MtCO₂/ano (23% a menos que no cenário de referência);
- no cenário de transição para o GNL (C5), a trajetória de emissões é semelhante à do cenário de referência, exceto pelos últimos dez anos, em que se verifica o efeito do menor fator de emissão do gás: em 2040, as emissões anuais chegam a 87 MtCO₂ (iguais às do cenário de referência);
- no cenário de biocombustíveis (C6), ocorre uma constante e significativa queda das emissões: em 2040, chega-se a 53 MtCO₂/ano (44% a menos que no cenário de referência);
- no cenário de alta mitigação (C7), combinam-se os impactos mitigadores dos cenários 4 e 6 e dessa forma, tem-se o menor valor de emissões anuais, igual a 43 MtCO₂ em 2040 (55% a menos que no cenário de referência).

Em seguida, propõem-se algumas reflexões a respeito dos resultados obtidos.

Inicialmente, discute-se o *gap* existente entre as emissões dos cenários 1 e 2, sobretudo a partir de 2030. De fato, verifica-se um aumento substancial das emissões no cenário contrafactual, o que se deve ao fato de se considerar um consumo específico fixo de 190 g/kWh. A princípio, tal resultado significaria um grande ganho trazido pelo EEDI. No entanto, como a linha de referência do índice baseia-se em valores de SFOC já ultrapassados e tendo em vista as metas pouco ambiciosas da política da IMO, conclui-se que o cenário 2 é excessivamente conservador e que um cenário contrafactual mais realista utilizaria um valor mais próximo de 175 g/kWh³.

Discorre-se também a respeito da influência do *slow steaming* sobre o tamanho da frota e sobre as emissões de CO₂. Como foram adotadas premissas bastante conservadoras no que se refere à ampliação da frota decorrente da navegação mais lenta, verificou-se um forte aumento da quantidade de navios, o que fez com que as emissões de motores e caldeiras auxiliares aumentasse sensivelmente. Não obstante, os ganhos obtidos pela redução do consumo de combustível em motores principais sobrecompensaram, com larga margem, o referido aumento. Em cenários de *slow* e *extra slow steaming*, verificou-se um curioso rearranjo da proporção entre motores principais e demais fontes de CO₂, com sistemas auxiliares tornando-se responsáveis por quase 60% das emissões no cenário de alta mitigação.

Finalmente, comenta-se sobre a disponibilidade de GNL e SVO frente a uma eventual transição do setor marítimo internacional para essas fontes de energia. Conclui-se que, no tocante ao gás natural, o grande gargalo seria a capacidade de liquefação, que ainda é relativamente baixa em todo o mundo. Já em relação ao SVO, o problema reside no próprio volume de produção, muito aquém dos níveis necessários para o abastecimento da frota mercante mundial.

³Ainda assim, não se captaria a evolução tecnológica natural.

6.2 Abrangência e utilidade

Conforme explicado ao longo da dissertação, pretendeu-se, por meio do trabalho, não apenas apresentar resultados referentes ao comércio de petróleo, mas também fornecer uma contribuição metodológica para a cenarização das emissões de qualquer produto transportado por meio de navios. A metodologia pode ser facilmente aplicada a outros granéis líquidos, a exemplo dos derivados do petróleo e dos biocombustíveis, bem como a granéis secos, como minério de ferro e grãos. Neste último caso, seriam necessárias adaptações pontuais.

Para o caso de produtos transportados por navios porta-contentores, uma dificuldade adicional seria o fato de que essa classe de navios transporta uma grande diversidade de produtos e, assim, a primeira parte do procedimento metodológico não seria aplicável. Encontrando-se uma maneira de superar tal obstáculo, não haveria problemas em adequar o restante do procedimento aos porta-contêineres, já que o modelo de resistência ao avanço e propulsão tem caráter genérico.

Nesse sentido, pode-se dizer que, a partir do presente estudo, é possível elaborar um modelo para a avaliação baseada em cenários da totalidade das emissões do transporte marítimo internacional.

Além desse subsídio metodológico, pode-se dizer que, conquanto sejam produto de algumas hipóteses questionáveis sob ponto de vista mais estrito, os resultados numéricos da cenarização realizada para movimentação de petróleo também constituem uma parte importante deste trabalho: por meio do cenário 1, construiu-se uma trajetória de referência de 25 anos para as emissões do setor e, por meio dos cenários de mitigação, determinou-se, *grosso modo*, um limite inferior para essas emissões nas próximas décadas, além do potencial impacto de cada medida.

Espera-se, com esta pesquisa, fornecer substrato às discussões acerca da elaboração de uma estratégia de enfrentamento do aquecimento global no âmbito da navegação marítima internacional, setor cuja omissão diante da questão climática, caso mantida, pode ser determinante para o não cumprimento das metas do Acordo de Paris.

6.3 Limitações da metodologia

Cabe ainda pontuar as principais limitações da metodologia adotada neste trabalho, as quais passamos a listar:

- considerou-se o petróleo como uma *commodity* homogênea, desprezando-se a existência de diferentes correntes e qualidades do óleo cru. Levar esse detalhe em consideração pode acarretar mudanças importantes como, por exemplo, restrições em relação aos possíveis parques refinadores de destino;
- utilizou-se apenas uma projeção de *trade* de petróleo, desprezando-se a possibilidade de se ter, por exemplo, uma forte redução na demanda por óleo bruto decorrente de eventuais políticas de redução do uso de combustíveis fósseis;
- calculou-se a importação por via marítima dos grandes consumidores de petróleo por meio de um método simplificado, baseado em projeções de demanda e produção;
- considerou-se inalterada a proporção de cada exportador no fluxo chegando a cada região, o que não condiz com as perspectivas de crescimento de dadas regiões produtoras e com o declínio de outras;
- apenas 37 rotas foram explicitamente levadas em consideração, tendo as demais sido tratadas de maneira agregada;
- apesar de cada rota envolver inúmeros portos, apenas dois foram levados em consideração como referência para o cálculo de distâncias;
- definiu-se apenas uma categoria por rota, desprezando-se a possibilidade de vários tipos de navios operarem na mesma rota;
- desprezaram-se as diferenças entre as subcategorias associadas às categorias Panamax, Aframax, Suezmax e VLCC;
- supôs-se que o perfil etário da frota existente em 2015 de cada uma das referidas categorias fosse o mesmo;
- assumiu-se que a frota existente em 2015 era precisamente aquela necessária para o transporte do *trade* do ano, não havendo sobredimensionamento ou subdimensionamento, estando a quantidade de navios dos anos seguintes livre para evoluir proporcionalmente ao comércio de petróleo;
- utilizou-se um modelo simplificado de resistência ao avanço, desprezando-se as diferentes possibilidades de formas de casco, cuja grande variedade implica perfis de resistência ao avanço distintos;

- considerou-se constante a velocidade dos navios, que pode, na realidade, variar de acordo com a condição de carga;
- consideraram-se condições climáticas padrão, com uma proporção fixa entre tempo em águas calmas e tempo sob condições mais severas. Desprezou-se, portanto, o fato de que certas rotas possam apresentar conter trechos de mar mais revolto que outras;
- a caracterização da condição de mau tempo baseou-se em valores fixos de ângulo de ataque e de velocidade do vento e também em valor constante de altura média das ondas;
- a eficiência em águas abertas, crucial para a determinação da eficiência total, foi determinada com base em valores típicos de navios-tanque de grande porte;
- o consumo específico foi considerado como independente da condição de carga do motor principal, o que não é rigorosamente verdade;
- o método de cálculo das emissões de motores e caldeiras auxiliares baseou-se em perfis operacionais típicos e valores médios de tempo de ancoragem e atracamento;
- o foco do trabalho foi o gás carbônico e, assim, desconsideraram-se as emissões de outros gases estufa (N_2O e CH_4);
- desconsideraram-se eventuais perdas de eficiência que podem ocorrer na operação em cargas baixas (notadamente associada aos cenários de *slow steaming*);
- desconsiderou-se a possibilidade de utilização de outros biocombustíveis, tais como o biogás e o *blend* MGO+biodiesel em motores principais.
- não foram avaliados outros cenários de mitigação potencialmente interessantes, como a eletrificação do transporte marítimo e a utilização de velas auxiliares para auxílio da propulsão.

6.4 Sugestões para trabalhos futuros

Em relação a pesquisas futuras, recomendam-se os seguintes pontos:

- aplicação da metodologia apresentada a outros produtos e ao setor marítimo internacional como um todo;
- utilização de modelos de avaliação integrada (IAMs) para o estabelecimento de cenários ou projeções de *trade* de petróleo;
- desagregação dos fluxos em um maior número de rotas marítimas;
- detalhamento das subcategorias de Panamax, Aframax, Suezmax e VLCC;
- detalhamento das condições climáticas por rota;
- aprimoramento do modelo de resistência ao avanço (utilizando-se, por exemplo, o método de Holtrop);
- aprofundamento da modelagem relativa ao consumo específico, considerando-se a variação do SFOC em função da carga do motor principal;
- análise da viabilidade econômica da prática do *slow steaming*;
- estudo das emissões indiretas geradas pelo aumento do número de navios em cenários de *slow steaming*;
- estudo do impacto do *slow steaming* sobre o trânsito de navios em pontos críticos, tais como os gargalos mencionados nesta dissertação.
- comparação econômica do GNL e do bunker como combustíveis marítimos;
- análise das emissões indiretas da cadeia do GNL;
- elaboração de cenários que levem em consideração as outras possibilidades de biocombustíveis, inclusive a transição bunker – gás – biogás;
- avaliação econômica e proposição de políticas de introdução de biocombustíveis;
- avaliação, a partir do modelo desenvolvido, do efeito de MBMs sobre a dinâmica do transporte marítimo de petróleo.

Referências Bibliográficas

- [1] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *World Maritime Day - A Concept of A Sustainable Maritime Transportation System*. Relatório técnico, 2013.
- [2] CHEVRON. “Everything You Need to Know About Marine Fuels”, *Chevron Global Marine Products*, 2012. Disponível em: <<http://www.chevronmarineproducts.com/>>. Último acesso em 4 de fevereiro de 2018.
- [3] INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). “Summary for Policymakers”. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- [4] UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). *Sustainable Development Goals*. Relatório técnico, 2015. Disponível em: <<http://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/brochure/>>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2018.
- [5] DOYLE, A., LEWIS, B. “With landmark climate accord, world mark turn from fossil fuels”, *Reuters*. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/us-climatechange-summit/with-landmark-climate-accord-world-marks-turn-from-fossil-fuels-idUSKBN0TV>>. Último acesso em 12 de fevereiro de 2018.
- [6] INTERNATIONAL MARITIME EMISSION REDUCTION SCHEME (IMERS). “Aviation, Shipping and the Paris Agreement”, 2016. Disponível em: <<http://www.imers.org/aviation-shipping-and-paris>>. Acessado em 8 de agosto de 2017.
- [7] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *Report of the Marine Environment Protection Committee on its Sixty-Fifth*

Sessions, 65 ed., 2013. Disponível em: <<http://www.staimo.org/Publications/Documents/MEPC%2065-Final%20report.pdf>>. Último acesso em 12 de fevereiro de 2018.

[8] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *Report of the Marine Environment Protection Committee on its Sixty-Second Sessions*, 62 ed., 2011. Disponível em: <https://www.cdlive.lr.org/information/Documents/IMOMarineServices2010/MEPC%2062%20Report%20EXTERNAL%20final%20draft%20_19%20July_.pdf>. Último acesso em 12 de fevereiro de 2018.

[9] HAUN, E. “71% of New Box Ships Exceed IMO’s 2025 EEDI -Study”, *Marine Link*, 2017. Disponível em: <<https://www.marinelink.com/news/exceed-ships-study429897>>. Acessado em 18 de janeiro de 2018.

[10] INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). “Chapter 8: Transport”. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

[11] UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). “Paris Agreement”, 2015. Disponível em: <http://unfccc.int/files/home/application/pdf/paris_agreement.pdf>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.

[12] INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). “Summary for Policymakers”. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

[13] ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. “History of Ships”, *Technology*, 2017. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/ship>>. Último acesso em 4 de fevereiro de 2018.

[14] UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). *Review of Maritime Transport 2017*. Relatório técnico, United Nations, New York and Geneva 2017, 2017.

- [15] HMS TRINCOMALEE. “Age of Sail”, *History*, 2018. Disponível em: <<http://www.hms-trincomalee.co.uk/history/age-of-sail>>. Último acesso em 4 de fevereiro de 2018.
- [16] DAHL, E. “From Coal to Oil”, *Naval Innovation*, 2001. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a524799.pdf>>. Último acesso em 4 de fevereiro de 2018.
- [17] MAN DIESEL & TURBO. *Basic Principles of Ship Propulsion*. Relatório técnico, 2011. Disponível em: <<https://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/propeller-aftship/basic-principles-of-propulsion.pdf?sfvrsn=0>>. Acesso em 5 de maio de 2017.
- [18] NATIONAL AGRICULTURAL INNOVATION PROJECT (NAIP). “Two Stroke and Four Stroke Engines, Working Principles, Applications - Types, Power and Efficiency”. Material didático. Disponível em: <<http://eagri.org/eagri50/FMP211/pdf/lec02.pdf>>. Último acesso em 5 de fevereiro de 2018.
- [19] HAIDER, S., MEYER, K. E., SCHRAMM, J. *Two Stroke Diesel Engines for Large Ship Propulsion*. Tese de Doutorado, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2011.
- [20] WANKHEDE, A. “Why 2-stroke Engines are Used More commonly than 4-stroke on Ships?” *Marine Insight*, 2016. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/main-engine/why-2-stroke-engines-are-used-more-commonly-than-4-stroke-on-ships/>>. Último acesso em 5 de fevereiro de 2018.
- [21] PETROBRAS. *Combustíveis Marítimos - Informações Técnicas*, 2013. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/manual-tecnico-combustiveis-maritimos-assistencia-tecnica-petrobras.pdf>>. Último acesso em 5 de fevereiro de 2018.
- [22] VISCOPIEDIA. “Bunker Oil - Marine Fuel Oil”, *Viscopedia - A free encyclopedia for viscosity*, 2003. Disponível em: <<http://www.viscopedia.com/viscosity-tables/substances/bunker-oil-marine-fuel-oil/>>. Último acesso em 5 de fevereiro de 2017.

- [23] FARAH, M. A. *Petróleo e Seus Derivados - Petrobras*. 1 ed. , LTC, 2012. ISBN: 978-85-216-2052-5.
- [24] MARINE INSIGHT. “A Brief Overview of Ship’s Auxiliary Engine - Part 1”. Apresentação de slides, 2016. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/wp-content/uploads/2016/08/Brief-Overview-Generator-free-ebook-part1-final.pdf>>. Último acesso em 5 de fevereiro de 2018.
- [25] WÄRTSILA. “Diesel Engine”, *Wärtsilä Encyclopedia of Marine Technology*, 2018. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/diesel-engine>>. Último acesso em 5 de fevereiro de 2018.
- [26] SMITH, T., ALDOUS, L., PARKER, S., et al. *Third IMO Greenhouse Gas Study*. Relatório técnico, International Maritime Organization (IMO), 2014. Disponível em: <<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>>.
- [27] MYSKOW, J., BORKOWSKI, T. “Emission inventory of exhaust gases from oil-fired ship boilers”, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, v. 19, 4, pp. 487–494, 2012.
- [28] THE WORLD BANK. “CO₂ emissions - Carbon Dioxide Information Analysis Center, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, United States.” Sítio internet, 12 2018. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?year_high_desc=true>. Acessado em 31 de dezembro de 2017.
- [29] INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF). *ITF Transport Outlook 2017*. Relatório técnico, OECD Publishing, Paris, 2017.
- [30] EUROPEAN PARLIAMENT. *Emissions Reduction Targets for International Aviation and Shipping*. Relatório técnico, Directorate-general for Internal Policies - Policy Department A - Economic and Scientific Policy, 2015. Disponível em: <[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/569964/IPOL_STU\(2015\)569964_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/569964/IPOL_STU(2015)569964_EN.pdf)>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [31] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). “Introduction to IMO”. Sítio internet, . Disponível em: <<http://www.imo.org>>.

org/en/about/pages/default.aspx>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.

[32] MAN DIESEL & TURBO. *Propulsion Trends in Bulk Carriers*. Relatório técnico, 2011. Disponível em: <<http://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/propulsion-trends-in-bulk-carriers.pdf?sfvrsn=24>>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.

[33] WANKHEDE, A. “What are Container Ships?” *Marine Insight*, 2016. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/types-of-ships/what-are-container-ships/>>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.

[34] YERGIN, D. *The prize: The epic quest for oil, money & power*. Simon and Schuster, 2011.

[35] MAN DIESEL & TURBO. *Propulsion Trends in Tankers*. Relatório técnico, 2011. Disponível em: <<http://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/propulsion-trends-in-tankers.pdf?sfvrsn=20>>. Acesso em 5 de maio de 2017.

[36] KSB. “Cargo oil pump”. Site internet. Disponível em: <<https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/cargo-oil-pump/191958/>>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2017.

[37] UNITED NATIONS (ONU). “United Nations Framework Convention on Climate Change”, 1992. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>>. Último acesso em 18 de fevereiro de 2018.

[38] TRANSPORT AND ENVIRONMENT. “Tackling Ship GHG Emissions at IMO”, *Seas at Risk*, 2017. Disponível em: <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/Ship_Emissions_Outreach_Note.pdf>. Último acesso em 18 de fevereiro de 2018.

[39] FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DOS TRABALHADORES EM TRANSPORTES. “Bandeiras de Conveniência: Evitando as Regras com Uma Bandeira Conveniente”, *A Força da Ação Solidária*, 2016. Disponível em: <<http://www.itfglobal.org/pt/transport-sectors/seafarers/in-focus/flags-of-convenience-campaign/>>. Último acesso em 18 de fevereiro de 2018.

- [40] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *Report of the Marine Environment Protection Committee on its Seventieth Sessions*, 70 ed., 2013. Disponível em: <<http://www.iadc.org/wp-content/uploads/2017/01/MEPC-70-18-Report-Of-The-Marine-Environment-Protection-Committee-On-Its-Seventieth-Sessions.pdf>>. Último acesso em 12 de fevereiro de 2018.
- [41] WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF). “MBM no transporte marítimo das exportações brasileiras e potenciais impactos na economia”. Sítio internet. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?57082/Medidas-baseadas-no-mercado-no-transporte-maritimo-das-exportacoes-brasileiras>>. Último acesso em 18 de fevereiro de 2018.
- [42] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). “Energy-efficiency requirements”. Sítio internet, . Disponível em: <<http://www.imo.org/en/MediaCentre/hottopics/ghg/pages/default.aspx>>. Último acesso em 18 de fevereiro de 2018.
- [43] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *IMO Train the Trainer Course on Energy Efficiency Ship Operation - Module 2: Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines*. Relatório técnico, 2013. Disponível em: <<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf>>. Acessado em 18 de novembro de 2017.
- [44] HONG LIANG, L. “The economics of slow steaming”, *Seatrade Maritime News*, 2011. Disponível em: <<http://www.seatrade-maritime.com/news/americas/the-economics-of-slow-steaming.html>>.
- [45] DIAS DE FREITAS, M. “Efeitos da aplicação de medidas de eficiência energética no transporte marítimo sobre as principais exportações brasileiras para a redução do consumo de combustível e emissão de CO₂”, *Trabalho de Planejamento Energético Integrado, PPE, Coppe/UFRJ*, 2018.
- [46] ZANNE, M., POČUČA, M., BAJEC, P. “Environmental and Economic Benefits of Slow Steaming”, *Transactions on Maritime Science*, v. 2, n. 02, pp. 123–127, 2013.
- [47] SAND, P. “Tanker shipping: still a strong market as demand stays high”, *BIMCO Market Analysis*, 2016. Disponível em: <https://www.bimco.org/news/market_analysis/2016/0125_tankersmoo_2016-01>. Último acesso em 9 de janeiro de 2018.

- [48] BUHAUG, O., J. CORBETT, J., EYRING, V., et al. *Second IMO Greenhouse Gas Study*. Relatório técnico, IMO, 2009. Disponível em: <<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>>.
- [49] CARIOU, P. “Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping?” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 16, n. 3, pp. 260–264, 2011.
- [50] SANGURI, M. *The Guide to Slow Steaming on Ships*. Relatório técnico, Marine Insight, Dezembro 2012. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/wp-content/uploads/2013/01/The-guide-to-slow-steaming-on-ships.pdf>>. Acessado em 23 de junho de 2017.
- [51] WIESMANN, A. “Slow steaming - a viable long-term option?” *Wärtsilä Technical Journal*, v. 02.2010, pp. 49–55, 2010. Disponível em: <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/service-catalogue-files/engine-services---2-stroke/slow-steaming-a-viable-long-term-option.pdf?sfvrsn=c1421e45_2>. Último acesso em 9 de fevereiro de 2018.
- [52] SEA DISTANCES. “Sea distances/Port distances”. Sítio internet. Disponível em: <<https://sea-distances.org>>. Acessado em 23 de julho de 2017.
- [53] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). “What is LNG?” Sítio internet. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=natural_gas_lng>. Último acesso em 10 de fevereiro de 2018.
- [54] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). “The 2020 global sulphur limit”, *Frequently Asked Question*, 2017. Disponível em: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/FAQ_2020_English.pdf>. Último acesso em 19 de fevereiro de 2018.
- [55] WÄRTSILÄ. *Low Sulphur Guidelines*. Relatório técnico, 2006. Disponível em: <<https://www.intertanko.com/upload/24779/LowSulphurGuidelines.pdf>>. Último acesso em 19 de fevereiro de 2018.

- [56] SHIP AND BUNKER. “Rotterdam Bunker Prices”. Sítio internet. Disponível em: <<https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#ULSF0>>. Último acesso em 19 de fevereiro de 2018.
- [57] KHASAWNEH, R. “Shell to fuel world’s first LNG-powered Aframax oil tankers”, *Reuters*, 2017.
- [58] SINGH, B. “LNG as a Fuel for the Shipping Industry”, *Marine Insight*, 2016. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/green-shipping/liquified-natural-gas-lng-as-fuel-for-the-shipping-industry/>>. Último acesso em 19 de fevereiro de 2018.
- [59] ECOFYS. *Potential of Biofuels for Shipping*. Relatório técnico, 2011. Disponível em: <https://www.ecofys.com/files/files/ecofys_2012_potential_of_biofuels_in_shipping_02.pdf>. Acesso em 5 de maio de 2017.
- [60] CZYRNEK-DELÈTRE, M. M., SMYTH, B. M., MURPHY, J. D. “Beyond carbon and energy: The challenge in setting guidelines for life cycle assessment of biofuel systems”, *Renewable Energy*, v. 105, pp. 436–448, 2017.
- [61] PORTUGAL-PEREIRA, J., NAKATANI, J., KURISU, K., et al. “Life cycle assessment of conventional and optimised *Jatropha* biodiesel fuels”, *Renewable energy*, v. 86, pp. 585–593, 2016.
- [62] PETROBRAS. “Biocombustíveis: 50 perguntas sobre este novo mercado”, 2007. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/matprima1_000g7pcetcc02wx5ok0wtedt32e6jis7.pdf>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [63] DE ANDRADE, E. T., DE CARVALHO, S. R. G., DE SOUZA, L. F. “Programa do Proálcool e o Etanol no Brasil”, *ENGEVISTA*, v. 11, 2, pp. 127–136, 2009. Disponível em: <<http://www.uff.br/enzimo/arquivos/arqix001.pdf>>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [64] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). “Technology Roadmap-Biofuels for Transport”, Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-biofuels-for-transport.html>>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.

- [65] FULTON, L. M., LYND, L. R., KÖRNER, A., et al. “The need for biofuels as part of a low carbon energy future”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 9, n. 5, pp. 476–483, 2015.
- [66] DE CARVALHO, F. M. *Evaluation of the Brazilian Potential for Producing Aviation Biofuels Through Consolidated Routes*. Tese de Mestrado, Coppe/UFRJ, Brasil, 2017.
- [67] BAUER, L. “Ocean Going Vessel Going Green”, *Biofuels Digest*, 2016. Disponível em: <<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/11/22/ocean-going-vessels-going-green/>>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [68] ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER (AFDC). “Ethanol Feedstocks”. Sítio internet. Disponível em: <https://www.afdc.energy.gov/fuels/ethanol_feedstocks.html>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [69] TAGOMORI, I. S. *Potencial Técnico e Econômico para a Produção de Fischer-Tropsch Diesel a partir da Biomassa (FT-BTL) Associada à Captura de Carbono no Brasil*. Tese de Mestrado, Coppe/UFRJ, Brasil, 2017.
- [70] BRITISH PETROLEUM (BP). “Statistical Review of World Energy”, *BP Statistical Review of World Energy*, , n. June, pp. 1–48, 2016. ISSN: 18766102. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>>.
- [71] VERMA, A., NIMANA, B., OLATEJU, B., et al. “A techno-economic assessment of bitumen and synthetic crude oil transport (SCO) in the Canadian oil sands industry: Oil via rail or pipeline?” *Energy*, v. 124, pp. 665–683, 2017.
- [72] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). “Overview of oil and natural gas in the Caspian Sea region”, *U.S. Energy Information Administration*, 2013. Disponível em: <https://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/regions_of_interest/Caspian_Sea/caspian_sea.pdf>. Acessado em 17 de agosto de 2017.

- [73] BENDER, J., ROSEN, A. “This Pentagon map shows what’s really driving China’s military and diplomatic strategy”, *Business Insider*, 2015. Disponível em: <<http://www.businessinsider.com/this-map-shows-chinas-global-energy-ties-2015-5>>. Acessado em 7 de setembro de 2017.
- [74] MAP CHART. “Map Chart - Create your own map”. Sítio Internet. Disponível em: <<https://mapchart.net/>>. Último acesso em 9 de fevereiro de 2018.
- [75] OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY (OEC). “Which countries import Crude Petroleum?” Sítio internet, 07 2017. Disponível em: <<https://atlas.media.mit.edu/en/>>. Acessado em 31 de julho de 2017.
- [76] SIX, S. *Russia’s Oil Export Strategy: Two Markets, Two Faces*. Relatório técnico, Clingendael International Energy Programme (CIEP), 2015.
- [77] UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). *Review of Maritime Transport 2016*. Relatório técnico, United Nations, New York and Geneva 2016, 2016.
- [78] NOGUERA-SANTAELLA, J. “Geopolitics and the oil price”, *Economic Modelling*, v. 52, pp. 301–309, 2016.
- [79] ZHANG, H.-Y., JI, Q., FAN, Y. “What drives the formation of global oil trade patterns?” *Energy Economics*, v. 49, pp. 639–648, 2015.
- [80] OPEC. *World Oil Outlook*, 10 ed., 2016. Disponível em: <http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/W00%202016.pdf>.
- [81] ROWLING, R., BLAS, J., BALA-GBOGBO, E. “Nigeria’s Forcados Oil Comes Back in Fresh Blow to OPEC Cuts”, *Bloomberg*, 2017. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-06-07/nigeria-s-forcados-oil-comes-back-in-fresh-blow-to-opec-curbs>>. Acessado em 28 de julho de 2017.
- [82] RENSHAW, J. “After long pause, Delta’s Philly refinery binges on Nigerian crude: sources”, *Reuters*, 2015. Disponível em: <<https://www.reuters.com/>>

article/us-refinery-operations-delta-air-lines-p/
after-long-pause-deltas-philly-refinery-binges-on-nigerian-crude-sources-i
Acessado em 28 de julho de 2017.

[83] FAIR, D. “Angola’s ports and oil terminals”, *Africa Insight - Ports and harbours*, v. 18, issue 4, pp. 197–201, 1988. Disponível em: <https://journals.co.za/content/afrins/18/4/AJA02562804_295>. Acessado em 28 de julho de 2017.

[84] HAMPTON, L. “Louisiana Offshore Oil Port seeks to export crude by early 2018”, *Reuters*, 2017. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/us-usa-oil-loop/louisiana-offshore-oil-port-seeks-to-export-crude-by-early-2018-idUSKBN1A9>>. Acessado em 28 de julho de 2017.

[85] BREMER, C. “Main Mexican oil ports closed due bad weather”, *Reuters*, 2009. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/us-mexico-ports/main-mexican-oil-ports-closed-due-bad-weather-idUSTRE50U10H20090131>>.

[86] AGEMAR VENEZUELA. “Puerto Miranda”. Sítio internet. Disponível em: <<http://www.agemar.net/popup/07.asp>>. Acessado em 23 de maio de 2017.

[87] PRUMO LOGÍSTICA. “Porto do Açu, porto de oportunidades”. Sítio internet, 11 2017. Disponível em: <<http://www.portodoacu.com.br/SitePages/sobre-o-porto/porto-do-acu.aspx>>. Acessado em 15 de novembro de 2017.

[88] DE RIJCK, A. *Russian Seaports*. Relatório técnico, Flanders - State of the Art, November 2015.

[89] TRICKETT, N. “The Reality of the Sino-Russian Oil Alliance”, *The Diplomat*, April 2017.

[90] FLUOR PROJECTS. “Saudi Aramco Ju’aymah - Crude Oil Terminal - Engineering & Construction Management”. Sítio internet. Disponível em: <<http://www.fluor.com/projects/juaymah-oil-terminal-pipelines-epcm>>. Acessado em 25 de maio de 2017.

[91] KHAN, R. “Transport Network in the Middle East Region: A Spatial Analysis”, *International Journal of Scientific Engineering and Rese-*

arch (IJSER), 2013. Disponível em: <<http://www.ijser.in/archives/v1i3/SjIwMTMONw==.pdf>>. Acessado em 3 de junho de 2017.

[92] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). *Country Analysis Brief: Sudan and South Sudan*. Relatório técnico, US Energy Information Administration, 2014. Disponível em: <<http://www.eisourcebook.org/cms/February%202016/sudan-south%20sudan%20authorities%20mgt%20ch6.pdf>>.

[93] ACIL TASMAN. *Petroleum import infrastructure in Australia*. Relatório técnico, 2009. Disponível em: <http://www.acilallen.com.au/cms_files/ACIL_petroleum_import_infrastrcuture.pdf>. Acessado em 7 de junho de 2017.

[94] KRYTON. *Seria Crude Oil Terminal*. Relatório técnico, 2012. Disponível em: <<https://www.kryton.com/wp-content/uploads/2012/04/SCOT-Brunei-2012.pdf>>. Acessado em 7 de junho de 2017.

[95] PORT OF ROTTERDAM. “Crude oil storage and throughput”. Sítio internet. Disponível em: <<https://www.portofrotterdam.com/en/cargo-industry/liquid-bulk/crude-oil-storage-and-throughput>>. Acessado em 23 de julho de 2017.

[96] TRANSALPINE PIPELINE (TAL). “SIOT - Società Italiana per l’Oleodetto Transalpino S.P.A.” Sítio internet. Disponível em: <<https://www.tal-oil.com/en/tal-group/siot.html>>. Acessado em 23 de julho de 2017.

[97] DEENDAYAL PORT TRUST. “Traffic Handled”. Sítio internet. Disponível em: <<http://www.kandlaport.gov.in/TrafficHandled.aspx>>. Acessado em 23 de julho de 2017.

[98] RUSSELL, C. “China’s appetite for crude oil may become less voracious: Russell”, *Reuters*, 2017. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/us-column-russell-crude-china/chinas-appetite-for-crude-oil-may-become-less-voracious-russell-idUSKCN1AV>>. Acessado em 18 de setembro de 2017.

[99] KRAUSS, C. “Disruption in Japan Slows Rise in Oil Price”, *The New York Times*, 2011. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2011/03/23/business/global/23oil.html>>. Acessado em 5 de julho de 2017.

- [100] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Republic of Korea - Oil & Gas Security - Emergency Response of IEA Countries*. Relatório técnico, 2011. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Korea_OSS2011.pdf>. Acessado em 15 de junho de 2017.
- [101] ROWLING, R., BLAS, J. “Oil Traders Empty Key Crude Storage Hub”, *Bloomberg*, 2017. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-09-20/oil-traders-empty-key-crude-storage-hub-as-global-demand-booms>>. Acessado em 28 de dezembro de 2017.
- [102] PETROBRAS. “Terminal São Sebastião”. Sítio internet. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/terminais-e-oleodutos/terminal-sao-sebastiao.htm>>. Acessado em 23 de maio de 2017.
- [103] BARANIUK, C. “Why are more and more oil ships anchoring off Singapore?” *BBC*, 2016. Disponível em: <<http://www.bbc.com/future/story/20160628-why-are-more-and-more-oil-ships-anchoring-off-singapore>>. Acessado em 28 de julho de 2017.
- [104] MARITIME CONNECTOR. “VLCC and ULCC”. Sítio internet, . Disponível em: <<http://maritime-connector.com/wiki/vlcc/>>. Acessado em 23 de maio de 2017.
- [105] MARITIME CONNECTOR. “Suezmax”. Sítio internet, . Disponível em: <<http://maritime-connector.com/wiki/suez/>>. Acessado em 23 de maio de 2017.
- [106] MARITIME CONNECTOR. “Aframax”. Sítio internet, . Disponível em: <<http://maritime-connector.com/wiki/afamax/>>. Acessado em 23 de maio de 2017.
- [107] MARITIME CONNECTOR. “Panamax”. Sítio internet, . Disponível em: <<http://maritime-connector.com/wiki/panamax/>>. Acessado em 23 de maio de 2017.
- [108] THE BALTIC EXCHANGE. “Baltic Exchange freight indices”. Sítio internet. Disponível em: <<https://www.balticexchange.com/>>

market-information/product-overview/indics/>. Acessado em 23 de maio de 2017.

[109] HALE & TWOMEY. *Australia's Maritime Petroleum Supply Chain*. Relatório técnico, 2013. Disponível em: <http://www.aip.com.au/sites/default/files/download-files/2017-09/Report_into_Australias_Maritime_Petroleum_Supply_Chain.pdf>. Acessado em 7 de agosto de 2017.

[110] INSTITUTE OF SHIPPING ECONOMICS AND LOGISTICS (ISL). *World Tanker Market*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <https://shop.isl.org/media/products/Web-Comment%20SSMR_61-3.pdf>. Acessado em 5 de agosto de 2017.

[111] UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). *Review of Maritime Transport 2015*. Relatório técnico, United Nations, New York and Geneva 2015, 2015.

[112] SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENGENHARIA NAVAL (SOBENA). “Principais Medidas, Dimensões e Características do Navio”. Sítio internet. Disponível em: <<http://www.sobena.org.br/wp-content/uploads/2015/07/Principais-Medidas.pdf>>. Acessado em 23 de maio de 2017.

[113] KRISTENSEN, H. O. *Determination of Regression Formulas for Main Dimensions of Tankers and Bulk Carriers based on IHS Fairplay data*. Relatório técnico, Technical University of Denmark, September 2012. Acessado em 15 de julho de 2017.

[114] CHAKRABORTY, S. “Understanding Design Of Oil Tanker Ships”, *Marine Insight*, 2017. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/naval-architecture/oil-tanker-ships/>>. Acessado em 18 de junho de 2017.

[115] ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY (EPA) - VICTORIA. “Ballast water”. Sítio internet. Disponível em: <<http://www.epa.vic.gov.au/your-environment/water/ballast-water>>. Acessado em 21 de julho de 2017.

[116] FAIRPLAY. “Ballast water treatment: options for all occasions”, *IHS Markit Maritime Portal*, 2010. Disponível em: <<https://fairplay.ihs.com/ship-construction/article/4112911/>>

ballast-water-treatment-options-for-all-occasions>. Acessado em 3 de agosto de 2017.

[117] ERNST, E. “Ship’s hull construction”. US Patent, 1967. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US3302603#backward-citations>>. Publication Number: US3302603A. Acessado em 23 de julho de 2017.

[118] MAANUM, M. O., SELNES, H. P. *Determinant of Vessel Speed in the VLCC Market - Theory vs. Practice*. Tese de Mestrado, Norges Handelshoyskole, Bergen, Norway, 2015.

[119] LINDSTAD, H., ESKELAND, G. S. “Low carbon maritime transport: How speed, size and slenderness amounts to substantial capital energy substitution”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 41, pp. 244–256, 2015.

[120] INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE (ITTC). *ITTC - Recommended Procedures: Fresh Water and Seawater Properties*, 2011. 7.5-02 -01-03, Revision 02.

[121] INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE (ITTC). *ITTC - Recommended Procedures: Resistance Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test*, 2002. 7.5-02 -02-02, Revision 01.

[122] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (NPL). “Kaye & Laby - Tables of Physical & Chemical Constants”. Sítio internet. Disponível em: <http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html>. Acessado em 2 de julho de 2017.

[123] LÜTZEN, M., KRISTENSEN, H. O. H. “A Model For Prediction of Propulsion Power and Emissions - Tankers and Bulk Carriers”, *World Maritime Technology Conference*, 2012.

[124] LINDSTAD, H., SANDAAS, I., STEEN, S. “Assessment of profit, cost, and emissions for slender bulk vessel designs”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 29, pp. 32–39, 2014.

[125] MELO, E., STRAIOTO, K., FRANCO, D., et al. “Distribuição estatística de alturas de ondas individuais em Santa Catarina: resultados preliminares”, *2o. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande*, 2006. Disponível em: <<http://www.semengo.furg.br/2006/19.pdf>>. Acessado em 4 de agosto de 2017.

- [126] GOMES, A. S. “Ondas Marinhas”, *Universidade Federal Fluminense (UFF) - Departamento de Biologia Marinha*, 2003. Disponível em: <<http://www.uff.br/ecosed/ondas>>. Acessado em 3 de agosto de 2017.
- [127] (NPL), N. P. L. “Buoyancy Correction and Air Density Measurement”, *Good Practice Guidance*, 2002. Disponível em: <<http://www.npl.co.uk/upload/pdf/buoycornote.pdf>>. Acessado em 3 de agosto de 2017.
- [128] VENTURA, M. “Estimation Methods for Basic Ship Design”. Material didático - Instituto Superior Técnico. Disponível em: <<http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/EN/SD-1.3.1-Estimation%20Methods.pdf>>. Acessado em 30 de setembro de 2017.
- [129] SAMPSON, R. “Propeller hull interaction - Resistance & Propulsion - MAR2010”. Material didático - Newcastle University. Disponível em: <<https://fr.scribd.com/document/222219911/prop-x-hull-pdf>>. Acessado em 30 de setembro de 2017.
- [130] CHOPRA, K. “14 Terminologies Used for Power of the Ship’s Marine Propulsion Engine”, *Marine Insight*, 2018. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/main-engine/12-terminologies-used-for-power-of-the-ships-marine-propulsion-engine/>>. Último acesso em 19 de fevereiro de 2018.
- [131] T, A. “3 Important Calculations Every Marine Engineer Must Know On Ships”, *Marine Insight*, 2017. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/guidelines/3-important-calculations-every-marine-engineer-must-know/>>. Acessado em 18 de junho de 2017.
- [132] KRISTENSEN, H. O. “Energy demand and exhaust gas emissions of marine engines”, *Project no. 2014-122: Mitigating and reversing the side-effects of environmental legislation on Ro-Ro shipping in Northern Europe*, 2015.
- [133] STARCREST CONSULTING GROUP. *Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions - 2012*. Relatório técnico, 2013. Disponível em: <https://www.portoflosangeles.org/pdf/2012_Air_Emissions_Inventory.pdf>. Acessado em 14 de julho de 2017.

- [134] PORT OF LONG BEACH. *2007 Air Emissions Inventory*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <<http://www.polb.com/civica/filebank/blobdload.asp?BlobID=6018>>. Acessado em 5 de dezembro de 2017.
- [135] COOPER, D., GUSTAFSSON, T. “Methodology for calculating emissions from ships”, *Swedish Methodology for Environmental Data*, 2004. Disponível em: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1117198/FULLTEXT01.pdf>>. Acessado em 3 de agosto de 2017.
- [136] CE DELFT. *Regulated Slow Steaming in Maritime Transport: An Assessment of Options, Costs and Benefits*. Relatório técnico, 2012. Disponível em: <https://www.cedelft.eu/index.php?/publicatie/regulated_slow_steaming_in_maritime_transport/1224>. Acessado em 20 de agosto de 2017.
- [137] MAN DIESEL & TURBO. *Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels*. Relatório técnico, 2011.
- [138] BAQUERO, G., ESTEBAN, B., RIBA, J.-R., et al. “Use of Rapeseed Straight Vegetable Oil as a Fuel Produced in Small-Scale Exploitations”, *Biofuel’s Engineering Process Technology*, 2011.
- [139] GILBERT, P., WALSH, C., TRAUT, M., et al. “Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels”, *Journal of Cleaner Production*, v. 172, pp. 855–866, 2018.
- [140] GOLDMAN SACHS GLOBAL ECONOMICS GROUP. “The N-11: More Than an Acronym”. In: *BRICs and Beyond*, 2007.
- [141] BENDER, J. “These 8 narrow chokepoints are critical to the world’s oil trade”, *Business Insider*, 2015. Disponível em: <<http://www.businessinsider.com/worlds-eight-oil-chokepoints-2015-4>>. Acesso em 2 de janeiro de 2018.
- [142] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). *World Oil Transit Chokepoints*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <https://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/special_topics/World_Oil_Transit_Chokepoints/wotc.pdf>. Acessado em 5 de janeiro de 2018.
- [143] RUCKS, J. T. *O estreito de Ormuz: da competição estratégica à Guerra Proxy regional no Oriente*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, 2017.

- [144] GOOGLE. “Google Maps”. Sítio internet. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2018.
- [145] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). “The Strait of Hormuz is the world’s most important oil transit chokepoint”, *Today in Energy*, 2012. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=4430>>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2018.
- [146] EKSTRÖM, E. *Market Based Measures to regulate CO2 emissions from international shipping*. Tese de Mestrado, University of Lund, Sweden, 2009.
- [147] WORLD WIDE FUND FOR NATURE - BRASIL (WWF-BRASIL) E COPPE/UFRJ. *Medidas baseadas no mercado no transporte marítimo das exportações brasileiras*. Relatório técnico, 2017.
- [148] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). “Review of proposed MBMs. Towards an optimal rebate key for a global maritime MBM”, *Submitted by the World Wide Fund for Nature (WWF)*, 2011. Disponível em: <http://www.imers.org/files/docs/ghg_wg_3-3-3_csc_wwf.pdf>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2018.
- [149] TRANSPORT & ENVIRONMENT. *Statistical analysis of the energy efficiency performance (EEDI) of new ships*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <<https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Statistical%20analysis%20of%20the%20energy%20efficiency%20performance%20%EEDI%29%20of%20new%20ships.pdf>>. Acessado em 18 de janeiro de 2018.
- [150] KRISTIANSEN, T. “ICS describes critical IMO report as nonsense”, *Shipping Watch*, 2017. Disponível em: <<https://shippingwatch.com/carriers/article10005273.ece>>.
- [151] INFLUENCEMAP. *Corporate Capture of the IMO*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <<https://influencemap.org/report/Corporate-capture-of-the-IMO-902bf81c05a0591c551f965020623fda>>. Acessado em 20 de janeiro de 2018.
- [152] BRITISH PETROLEUM (BP). *BP Statistical Review of World Energy - June 2017*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/>>

- bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>. Acessado em 13 de janeiro de 2018.
- [153] MATHIAS, M. C. P. P. *A Formação da Indústria Global de Gás Natural: Definição, Condicionantes e Desafios*. Tese de Doutorado, Coppe/UFRJ, Brasil, 2008.
- [154] INTERNATIONAL GAS UNION (IGU). *World LNG Report*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <https://www.igu.org/sites/default/files/103419-World_IGU_Report_no%20crops.pdf>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2018.
- [155] SHELL. “Shell Strengthen LNG Fuel Business with Innovative Bunker Vessel and Bunker Barge Charter”, *LNG for transport*, 2017. Disponível em: <<https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/lng-for-transport/news-and-media-releases/>>. Último acesso em 17 de fevereiro de 2018.
- [156] THOMSON, H., CORBETT, J. J., WINEBRAKE, J. J. “Natural gas as a marine fuel”, *Energy Policy*, v. 87, pp. 153–167, 2015.
- [157] STATISTA. “Consumption of vegetable oils worldwide”. Sítio internet, 2018. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-global-consumption/>>. Último acesso em 23 de janeiro de 2018.
- [158] STATISTA. “Leading biodiesel producers worldwide in 2016”. Sítio internet, 2018. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/271472/biodiesel-production-in-selected-countries/>>. Último acesso em 23 de janeiro de 2018.
- [159] BENGTTSSON, S., FRIDELL, E., ANDERSSON, K. “Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping”, *Energy Policy*, v. 44, pp. 451–463, 2012.
- [160] LABORATÓRIO DE ESTUDOS EM DIREITO AQUAVIÁRIO E CIÊNCIA DA NAVEGAÇÃO - UFSC. “Aula 03 e 04: Navio e Navegação”. Material didático. Disponível em: <http://www.aquaseg.ufsc.br/files/2012/06/AULA_-03_04_Navio_Navega\unhbox\voidb@x\setbox\z@hbox{c}\accent24cao.pdf>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.

- [161] CHAKRABORTY, S. “Hull of a Ship - Understanding Design and Characteristics”, *Marine Insight*, 2017. Disponível em: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/hull-ship-understanding-design-characteristics/>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [162] ALMEIDA, J. A. “Nomenclatura do Navio”. Material didático. Disponível em: <http://termo.furg.br/ArteNaval/Apres/ArtNav01a.pdf>. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [163] MARTINS, M. R. “Hidrostática e Estabilidade”, *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Naval e Oceânica*, 2010. Disponível em: http://www.ndf.poli.usp.br/~gassi/disciplinas/pnv2341/Martins_2010_Hidrosto\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{a\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\accent19a\egroup\spacefactor\accent@spacefactortica_e_Estabilidade_PNV2341.pdf. Último acesso em 6 de fevereiro de 2018.
- [164] OTEN MARITIME STUDIES. “Why a boat floats - weight and buoyancy”. Sítio internet. Disponível em: <http://www.otenmaritime.com/stability/why-a-boat-floats-weight-and-buoyancy>. Último acesso em 6 de fevereiro.
- [165] LEWIS, E. V. “Principles of naval architecture second revision”, *Jersey: SNAME*, 1988.
- [166] BERTRAM, V. “Practical ship hydrodynamics”, 2012.

Apêndice A

Princípios básicos de resistência ao avanço e propulsão

A.1 Principais grandezas e dimensões em uma embarcação

Navios são embarcações de grande porte destinadas ao transporte marítimo de mercadorias ou pessoas [160]. A principal estrutura de um navio é seu casco, que pode ser definido como o invólucro impermeável que protege a carga e as máquinas contra a inundação e o mau tempo [161] ou ainda como o corpo do navio sem mastreação, aparelhos acessórios ou qualquer outro arranjo [162].

A.1.1 Deslocamento e porte

De acordo com a Mecânica Clássica, o equilíbrio ocorre quando a resultante das forças externas e a soma dos momentos externos agindo sobre dado corpo são nulas. Para um corpo flutuante, essa condição de equilíbrio traduz-se¹ pelo Princípio de Arquimedes, ou seja, pela igualdade entre os módulos das forças peso (\vec{P}) e empuxo hidrostático (\vec{E}), isto é,

$$mg = \rho g V, \quad (\text{A.1})$$

em que ρ é a densidade do fluido, g , a aceleração da gravidade e V o volume de fluido deslocado [163].

¹Mais precisamente, a condição de equilíbrio de um corpo flutuante traduz-se pela igualdade entre os módulos das forças peso e empuxo hidrostático, mas também pela coincidência de suas linhas de ação, estando os vetores \vec{P} e \vec{E} na mesma direção, em sentidos opostos.

No âmbito náutico, tal volume deslocado é uma das grandezas fundamentais para a compreensão da física das embarcações e recebe o nome de deslocamento (∇). Ao flutuar em determinada condição de carga, um navio desloca uma quantidade de água igual à sua própria massa². Assim, o deslocamento ∇ de uma embarcação carregando uma certa massa é igual a [17]

$$\nabla = \text{massa da embarcação} + \text{massa da carga.} \quad (\text{A.2})$$

O valor de ∇ é obtido ao se multiplicar o volume submerso da embarcação pela densidade da água em que se navega. No entanto, o deslocamento também pode ser expresso em base volumétrica. Nesse caso, é definido como [17]

$$\nabla [\text{m}^3] = \frac{\nabla [\text{t}]}{\rho_w}, \quad (\text{A.3})$$

em que ρ_w representa a densidade da água (em mares e oceanos, geralmente em torno de 1,025 t/m³ [120]).

Conforme apontado pela equação A.2, o deslocamento reflete o peso de duas entidades distintas, a própria embarcação e seu conteúdo. Assim, ∇ pode ser decomposto em duas parcelas (figura A.1): à primeira parcela, chamada deslocamento leve (*ship's light weight* - LWT), está vinculado o peso do navio em si, com todos os acessórios de casco, equipamentos e máquinas, porém sem carga [112]. Trata-se do deslocamento observado caso o navio esteja completamente vazio³. Já o peso morto DWT refere-se aos pesos variáveis. O porte DWT_{max} é definido como o peso variável máximo, sendo dado em dwt, ou seja, toneladas de peso morto.

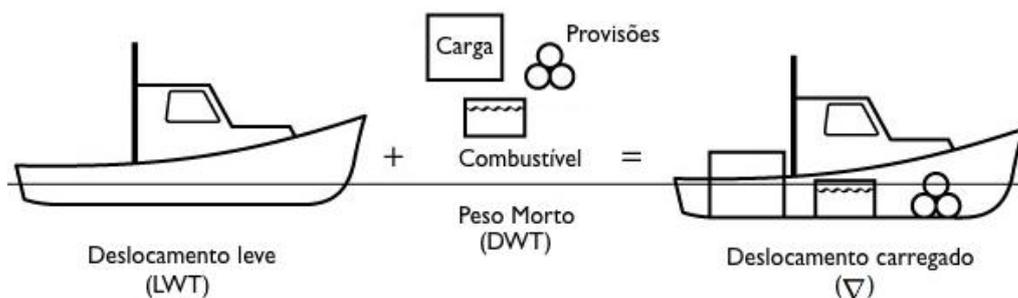


Figura A.1: Deslocamento leve e peso morto
Fonte: Adaptado de [164]

Para uma condição de carga qualquer, pode-se dizer que [17]

$$\text{DWT} = \nabla - \text{LWT.} \quad (\text{A.4})$$

²Massa total da condição de carga considerada.

³Corresponde a uma condição que, na prática, não é observada, já que há sempre pessoas, água e algum combustível a bordo.

Deve-se ressaltar ainda a diferença entre porte bruto e porte líquido⁴ em um navio mercante. Enquanto o primeiro diz respeito à totalidade da carga variável, o segundo refere-se exclusivamente à parcela de valor comercial. Assim, o porte líquido (DWCC) pode ser definido como a quantidade máxima de carga paga que pode ser embarcada. Note-se que tal definição exclui elementos como água, combustível e provisões [112].

A.1.2 Geometria da embarcação (dimensões lineares)

Entre as dimensões longitudinais de uma embarcação, destacam-se (figura A.2):

- comprimento de roda a roda (*overall length, L_{OA}*), a distância entre os pontos mais salientes da roda e do cadaste, que se confunde com o comprimento total caso não haja apêndices que se projetem além desses pontos [112]. Sob condições normais, não importa para o cálculo da resistência ao avanço da embarcação [17];
- comprimento na linha de flutuação⁵ (*waterline length, L_{WL}*), o comprimento da embarcação medido no plano de flutuação de projeto [112];
- comprimento entre perpendiculares (*length between perpendiculars, L_{PP}*), a distância entre as perpendiculares a vante e a ré [112]. Geralmente, o comprimento entre perpendiculares é ligeiramente inferior ao comprimento na linha de flutuação [17].



Figura A.2: Dimensões do casco (vista lateral)

Fonte: Elaboração própria com base em figura de [17]

Já o calado (D) é a profundidade a que se encontra o ponto mais baixo da quilha, tomando-se como referência a linha d'água. O calado é medido verticalmente a partir de um ponto na superfície externa [17].

⁴Porte útil, porte líquido ou expoente de carga líquido.

⁵Comprimento na linha de flutuação ou comprimento na linha d'água.

Do ponto de vista das seções transversais da embarcação, o mais importante parâmetro é a boca máxima na linha d'água (*largest breadth on waterline*, B_{WL}), ilustrada na figura A.3.

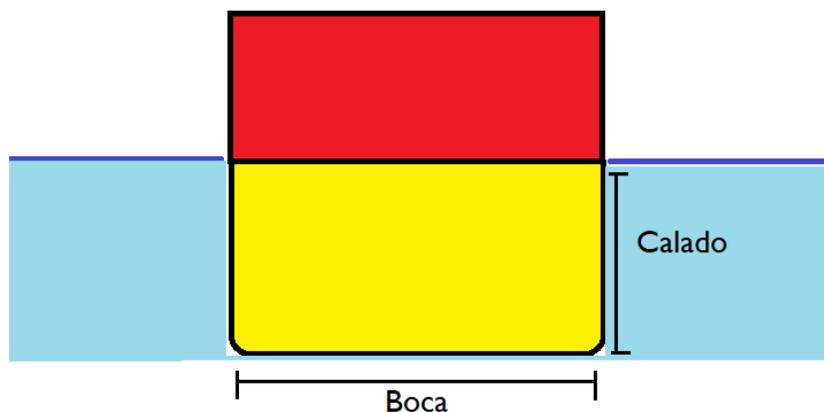


Figura A.3: Dimensões do casco (corte transversal)
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [17]

A.1.3 Coeficientes

As dimensões lineares, como boca (B), calado (D) e comprimento na linha d'água (L_{WL}) fornecem informações a respeito do tamanho de uma embarcação, mas, por si só, nada dizem sobre sua forma. Para melhor definir as características de dado navio, é preciso conhecer seus coeficientes de forma, grandezas adimensionais que relacionam o deslocamento às dimensões lineares, tendo grande utilidade no projeto de embarcações e provendo informações acerca da forma do casco [17]. A seguir apresentamos os principais coeficientes de forma:

- coeficiente de bloco (*block coefficient*, C_B). É definido como a razão entre o deslocamento⁶ e o volume de um paralelepípedo de dimensões L_{WL} ⁷, B_{WL} e D ,

$$C_B = \frac{\nabla}{L_{WL} B_{WL} D}. \quad (\text{A.5})$$

Note-se que o valor de C_B muda de acordo com o calado (ou seja, de acordo com a condição de carga) [17];

⁶Em base volumétrica.

⁷O coeficiente de bloco também pode ser definido com base no comprimento entre perpendiculares. Nesse caso, será ligeiramente maior [17].

- coeficiente da linha d'água (*water plane area coefficient*, C_{WL}), que expressa a razão entre a área de flutuação (A_{WL}) e o retângulo que a circunscribe,

$$C_{WL} = \frac{A_{WL}}{L_{WL} B_{WL}}; \quad (\text{A.6})$$

- coeficiente de seção mestra (*midship section coefficient*, C_M), que expressa a razão entre a área da seção mestra (A_M) e o retângulo que a circunscribe,

$$C_M = \frac{A_M}{B_{WL} D}; \quad (\text{A.7})$$

- coeficiente prismático longitudinal (*longitudinal prismatic coefficient*, C_P), que expressa a razão entre o volume deslocado ∇ e o produto da área da seção mestra pelo comprimento da linha de flutuação,

$$C_P = \frac{\nabla}{A_M L_{WL}}. \quad (\text{A.8})$$

A.2 Resistência ao avanço

Os principais parâmetros dos quais depende a resistência ao avanço de um navio são sua velocidade (v), seu deslocamento (∇) e a forma de seu casco. A resistência total R_T é formada a partir de componentes de diferentes naturezas que podem ser divididas em três grupos, quais sejam [17],

- resistência friccional ou de atrito (R_F);
- resistência residual (R_R);
- resistência do ar (R_A).

Enquanto os valores de R_F e R_R relacionam-se à parte submersa do casco (obras vivas), o valor de R_A está ligado à parte emersa do navio (obras mortas), que está em contato com o ar [17].

A.2.1 Resistência friccional (R_F)

A componente de atrito, que constitui uma parcela considerável da resistência total⁸, depende da área da superfície molhada do casco (S) e do coeficiente de resistência friccional C_F , comumente calculado por meio da equação definida na *International Towing Tank Conference* de 1957 [121],

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2}, \quad (\text{A.9})$$

sendo Re o número de Reynolds,

$$Re = \frac{vL}{\nu}, \quad (\text{A.10})$$

em que v é velocidade do navio, L a característica linear do escoamento (no caso, $L = L_{WL}$) e ν , a viscosidade cinemática da água. Assim, [165]

$$R_F = \frac{\rho C_F S v^2}{2} \quad (\text{A.11})$$

A.2.2 Resistência residual (R_R)

A componente residual compreende [17]:

- resistência de ondas (*wave resistance*, R_W), ligada ao fato de que o navio, ao mover-se, gera ondas que contribuem para a perda de energia [166]. A baixas

⁸Entre 40% e 90%, de acordo com o tipo de navio e com as condições climáticas [17].

velocidades, o valor de R_W é proporcional ao quadrado de v e, a altas velocidades, cresce a taxas muito mais elevadas, estabelecendo um limite praticamente intransponível para a velocidade da embarcação [17];

- resistência de geração de vórtices (*eddy resistance*, R_E), relacionada às perdas causadas por separações de escoamento, que criam pequenos redemoinhos, especialmente na extremidade a ré da embarcação [17].

Normalmente, a componente residual contribui com 8% a 60% da resistência total (sendo mais relevante no caso de navios de alta velocidade, justamente pela dinâmica de aumento de R_W como função de v) [17].

A.2.3 Resistência do ar (R_A)

Em boas condições meteorológicas, a resistência do ar é, em princípio, proporcional ao quadrado da velocidade e diretamente proporcional à área de seção transversal do navio acima da linha de flutuação. Trata-se de uma parcela menos significativa em termos de magnitude: em condições normais, representa em torno de 2% da resistência total da embarcação⁹ [17].

Assim como R_F e R_R , R_A pode ser expressa em função da força de referência K . No entanto, é comumente calculada como uma fração da pressão dinâmica do ar com velocidade V , de acordo com a equação A.12 [17].

$$R_A = (90\%) \left(\frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 S_{ar} \right) \quad (\text{A.12})$$

A.2.4 Resistência total e potência efetiva de reboque

De acordo com os conceitos apresentados na seção anterior, tem-se a seguinte expressão para resistência ao avanço de um navio:

$$R_T = R_F + \underbrace{R_W + R_E}_{R_R} + R_A. \quad (\text{A.13})$$

A potência necessária para que o navio vença a resistência R_T , movendo-se à velocidade v é denominada potência efetiva de reboque (*towing power*),

$$P_E = v R_T. \quad (\text{A.14})$$

⁹Embora, em alguns casos, possa atingir valores consideráveis. Em um navio porta-contêineres enfrentando vento de proa, R_A pode chegar a 10% da resistência total.

A.3 Propulsão

Normalmente, a propulsão de grandes embarcações ocorre por meio da ação de um ou dois propulsores¹⁰. De maneira geral, o empuxo T requerido para mover um navio a dada velocidade v é superior à sua resistência total de reboque R_T [17]. Nesta seção, apresentam-se, de maneira simplificada, as eficiências envolvidas na conversão da energia do motor em energia útil.

A.3.1 Condições de escoamento em torno do propulsor (w)

Com o navio em movimento, o atrito cria uma camada limite de água em torno do casco. No interior da camada, a velocidade da água na superfície do casco é igual à do navio, caindo conforme a distância ao casco aumenta. A uma dada distância (fronteira da camada), a velocidade da água é igual a zero. A espessura da camada limite é menor na extremidade a vante, crescendo até se tornar máxima na extremidade a ré (aproximadamente proporcional ao comprimento) [17].

O efeito do atrito entre água e casco cria, portanto, uma “esteira”, que faz com que haja uma redução da velocidade da água que chega à hélice do propulsor (a velocidade de esteira gerada tem mesma direção e sentido do movimento do navio). Dessa forma,

$$v_A = v - v_W, \quad (\text{A.15})$$

em que v é a velocidade da embarcação, v_W a velocidade de esteira e v_A , a velocidade de avanço do propulsor. O valor de v_A representa a velocidade com que de fato o propulsor vê a água se aproximar¹¹ [17]. O efeito de esteira pode ser expresso sob a forma de um coeficiente adimensional w , dado por

$$w = \frac{v_W}{v} = \frac{v - v_A}{v}. \quad (\text{A.16})$$

O valor de w depende fortemente da forma do casco, mas também da localização e do tamanho do propulsor. Sua influência sobre a eficiência é considerável [17].

A.3.2 Coeficiente de redução da força propulsora (t)

A rotação da hélice faz com que a água imediatamente à sua frente seja “puxada” de volta em direção ao propulsor. Isso representa uma resistência extra F a ser adicionada à resistência ao avanço R_T . Em outras palavras, o empuxo T a ser desenvolvido pelo sistema de propulsão em dado instante deverá superar não só a

¹⁰Em raros casos, mais de dois.

¹¹Mais precisamente, a velocidade de avanço v_A é dada pela velocidade média da água sobre a área do disco do propulsor.

resistência do casco como também a “perda de empuxo” F [17]. A redução da força propulsora é comumente expressa em função do coeficiente adimensional

$$t = \frac{F}{T} = \frac{T - R_T}{T}. \quad (\text{A.17})$$

A.3.3 Eficiências

Considere-se uma embarcação navegando com potência de resistência ao avanço igual a P_E . Nesse caso, a potência demandada na saída do motor principal é igual a

$$P_B = \frac{P_E}{\eta_H \eta_R \eta_0 \eta_S} \quad (\text{A.18})$$

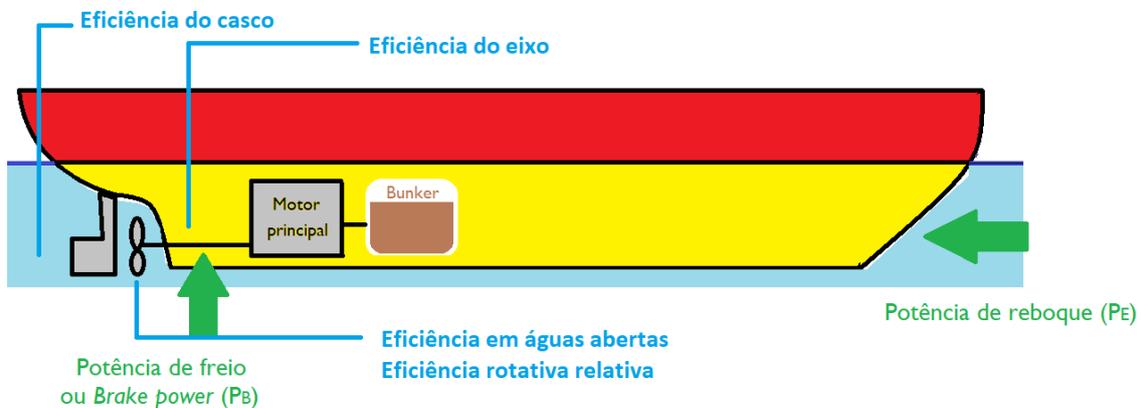


Figura A.4: Potência de freio e eficiências
Fonte: Elaboração própria com base em figura de [17]

Eficiência de casco

A eficiência de casco é definida como a relação entre a potência de reboque e a potência de empuxo entregue à água, ou seja,

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T v}{T v_a} = \frac{R_T/T}{v_A/v} = \frac{1 - t}{1 - w}. \quad (\text{A.19})$$

Eficiência de águas abertas

A eficiência de águas abertas η_0 refere-se ao funcionamento do hélice em um campo homogêneo, sem casco. Normalmente, varia entre 0,35 e 0,75, com altos valores ocorrendo em altas velocidades de avanço.

Eficiência rotativa relativa

A velocidade real da água em direção ao hélice é afetada por um fluxo rotacional. O efeito desse fluxo, que, em geral, é benéfico, é contabilizado por meio da eficiência rotativa relativa (η_R), que varia entre 1,00 e 1,07.

Eficiência do eixo

Deve-se levar em consideração ainda a eficiência do eixo η_S , que representa a perda de energia entre a saída do motor e o hélice. Seu valor varia entre 0,960 e 0,995.

Eficiência atrás do casco

É definida pelo produto entre eficiência em águas abertas e eficiência rotativa relativa.

$$\eta_B = \eta_0 \times \eta_R \quad (\text{A.20})$$

Eficiência propulsiva

É definida pelo produto entre eficiência do hélice atrás do casco e eficiência de casco.

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B \quad (\text{A.21})$$

Eficiência total

A eficiência total η_T é dada por

$$\eta_T = \eta_D \times \eta_S = \eta_H \times \eta_B \times \eta_S = \eta_H \times \eta_R \times \eta_0 \times \eta_S. \quad (\text{A.22})$$

Apêndice B

Detalhamento de dados e resultados

O objetivo deste apêndice é mostrar os dados completos utilizados para determinação do comércio internacional de petróleo por via marítima em 2015, a que se fez referência no capítulo de metodologia. Os referidos dados são mostrados na tabela B.1 [70]. Na tabela, “ACS” designa a região Américas Central e do Sul, enquanto “OM” refere-se ao Oriente Médio.

Mostram-se também, nas tabelas B.2 a B.7, os resultados numéricos dos sete cenários (emissões de CO₂ e consumo de combustíveis).

Tabela B.1: Movimentos inter-regionais de óleo cru em 2015

Unidade: milhões de toneladas (Mt)

<i>Origem/Destino</i>	EUA	Canadá	ACS	Europa	CEI	OM	África	Oceania	China	Índia	A. Pacífico	Total
Estados Unidos	-	21,0	0,4	1,8	-	0,2	0,3	†	0,1	†	0,5	24,5
Canadá	157,8	-	†	1,4	-	-	-	-	0,1	†	†	159,4
México	34,3	-	0,4	13,7	-	-	-	-	0,8	6,3	4,2	59,8
Américas Central e do Sul	79,7	0,6	-	14,6	†	-	-	-	41,7	29,2	6,5	172,4
Europa	1,3	0,8	1,2	-	†	†	0,4	†	2,1	0,7	3,6	10,2
Rússia	1,4	-	0,9	158,5	23,2	0,2	0,9	1,6	42,4	0,1	25,4	254,7
Outros - CEI	0,7	0,6	-	56,0	2,9	6,6	0,7	-	5,3	1,4	6,9	81,0
Oriente Médio	74,1	4,1	4,9	108,3	†	-	12,9	6,3	170,4	114,5	384,1	879,6
Norte da África	0,4	2,3	1,1	48,4	-	0,3	-	-	3,9	3,6	1,5	61,5
Oeste da África	13,6	3,2	10,8	85,3	-	-	-	2,4	52,3	33,5	14,4	215,5
Sul e Leste da África	-	-	-	†	-	-	-	-	8,3	0,2	-	8,4
Oceania	0,5	-	0,4	†	-	†	†	-	2,4	†	5,9	9,2
China	-	-	†	-	-	0,4	†	†	-	0,4	1,9	2,8
Índia	0,1	-	†	†	-	-	-	0,1	-	-	†	0,2
Japão	-	-	-	-	-	-	-	†	†	0,3	†	0,3
Singapura	-	-	-	-	-	-	-	†	†	-	0,1	0,1
Outros - Ásia Pacífico	2,2	-	†	†	-	0,1	-	14,1	5,9	4,9	10,7	37,8
Total - importações	366,0	32,7	20,1	488,1	26,1	7,8	15,2	24,5	335,8	195,8	465,8	1977,2

† representa fluxo inferior a 0,05 Mt

Fonte: [70]

Tabela B.2: Emissões de CO₂ - cenário 1

	<i>Emissões de CO₂ (Mt)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
Motores principais	66,1	70,3	69,9	70,6	72,3	73,1
Motores auxiliares	13,0	13,6	13,5	13,2	13,9	14,6
Caldeiras	8,4	8,8	8,8	8,6	9,2	9,6
Total	87,5	92,6	92,2	92,4	95,4	97,2

Tabela B.3: Emissões de CO₂ - cenário 2

	<i>Emissões de CO₂ (Mt)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
Motores principais	66,1	72,4	74,2	78,7	86,2	92,9
Motores auxiliares	13,0	14,0	14,4	14,5	15,8	17,1
Caldeiras	8,4	9,1	9,4	9,5	10,4	11,3
Total	87,5	95,5	98,0	102,7	112,4	121,3

Tabela B.4: Emissões de CO₂ - cenário 3

	<i>Emissões de CO₂ (Mt)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
Motores principais	66,1	50,3	50,2	51,0	52,6	53,7
Motores auxiliares	13,0	16,3	16,2	15,8	16,7	17,5
Caldeiras	8,4	10,6	10,6	10,4	11,0	11,5
Total	87,5	77,1	77,0	77,2	80,4	82,6

Tabela B.5: Emissões de CO₂ - cenário 4

	<i>Emissões de CO₂ (Mt)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
Motores principais	66,1	33,8	33,9	34,6	36,0	37,0
Motores auxiliares	13,0	20,3	20,3	19,8	20,9	21,8
Caldeiras	8,4	13,2	13,2	13,0	13,7	14,4
Total	87,5	67,3	67,4	67,4	70,7	73,2

Tabela B.6: Emissões de CO₂ - cenário 5

	<i>Emissões de CO₂ (Mt)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
Motores principais	66,1	69,1	67,6	66,7	65,1	61,7
Motores auxiliares	13,0	13,6	13,5	13,2	13,9	14,6
Caldeiras	8,4	7,9	7,1	6,1	5,5	4,8
Total	87,5	91,5	89,9	88,5	88,2	85,8

Tabela B.7: Emissões de CO₂ - cenário 6

	<i>Emissões de CO₂ (Mt)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
Motores principais	8,4	7,9	7,1	6,1	5,5	4,8
Motores auxiliares	13,0	12,8	12,0	10,9	10,8	11,3
Caldeiras	66,1	63,2	55,9	49,4	43,4	36,6
Total	87,5	84,0	74,9	66,4	59,7	52,7

Tabela B.8: Emissões de CO₂ - cenário 7

	<i>Emissões de CO₂ (Mt)</i>					
	<i>2015</i>	<i>2020</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>
Motores principais	66,1	30,4	27,1	24,2	21,6	18,5
Motores auxiliares	13,0	19,2	18,0	16,4	16,2	17,0
Caldeiras	8,4	11,9	10,6	9,1	8,2	7,2
Total	87,5	61,5	55,7	49,8	46,1	42,6