

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



MARCUS VINÍCIUS ADORNO BORGES PINTO

Hibridização de embarcações offshore

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro
Outubro 2023



MARCUS VINÍCIUS ADORNO BORGES PINTO

Hibridização de embarcações offshore

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica –
PUC-Rio

Prof. Florian Alain Yannick Pradelle

Departamento de Engenharia Mecânica –
PUC-Rio

Prof. Gisele Maria Ribeiro Vieira

CEFET/RJ

Prof. Marco Antonio Haikal Leite

PUC-Rio

Prof. Albino José Kalab Leiroz

UFRJ

Rio de Janeiro, 11 de outubro, 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcus Vinícius Adorno Borges Pinto

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Bahia em 2009, tendo cursado um semestre de Ingeniería Mecánica na Universidad de Cantabria - Espanha. Obteve o título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Pernambuco em 2017. Durante o Doutorado, foi agraciado com a “bolsa nota 10” da FAPERJ em 2020.

Ficha Catalográfica

Pinto, Marcus Vinícius Adorno Borges

Hibridização de embarcações offshore/ Marcus Vinícius Adorno Borges Pinto; orientador: Sergio Leal Braga. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2023.

144 f.: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia

1. Eficiência Energética-Teses. 2. Transição energética. 3. Armazenamento de Energia 4. Bateria de Lítio. I. Braga, Sérgio L. II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CCD: 621

Para Roberta, cuja paciência, amor e apoio foram cruciais para a conclusão deste trabalho.

Agradecimentos

Ao escrever estes agradecimentos, penso no dia em que entrei pela primeira vez na PUC e toda a trajetória percorrida até então. Sem dúvida, a minha assinatura neste trabalho leva consigo muitos outros nomes que foram corresponsáveis pela finalização desta obra.

Agradeço primeiramente a Deus por me conduzir sempre.

À minha família, principalmente a meus Pais, meus alicerces, que mesmo distante se fazem presentes todos os dias com incentivos e certamente fazem da minha realização a deles também.

A Roberta, minha grande companheira de vida, que dividiu comigo, mais que ninguém, as dores e alegrias nestes últimos anos, me ajudando, inclusive, em questões técnicas neste trabalho. Não consigo expressar com palavras o quanto devo a você.

Aos meus amigos, antigos e novos, em especial a Fernanda e Marcelo pela acolhida no Rio no início dessa jornada e àqueles que fiz na PUC e que compartilharam os desafios comigo. Belinha, Rodrigo, Bernardo, Renato e Vanessa, meus queridos, obrigado por fazerem mais leve e divertida esta caminhada.

Agradeço à Diretoria de Gestão de Programas da Marinha do Brasil, em especial aos colegas da SUP-20 que foram solícitos sempre que precisei me ausentar para resolver questões do Doutorado. Serei sempre grato por isso.

A todos os profissionais da PUC que estiveram envolvidos neste projeto, pelo profissionalismo e grande dedicação em todos os momentos.

Agradeço também a todos os professores e corpo administrativo do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Leal Braga por me aceitar como orientando, pelos conselhos durante os trabalhos, pela generosidade em compartilhar parte do seu conhecimento, paciência e amizade.

Finalmente, agradeço ao CNPq, FAPERJ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)-Código de Financiamento 001

Resumo

Pinto, Marcus Vinícius Adorno Borges; Braga, Sergio Leal. **Hibridização de embarcações offshore**. Rio de Janeiro, 2023, 144p. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com enfoque na transição energética industrial, com destaque para o setor de transportes, a aplicação da hibridização como forma de otimizar produção energética em embarcações é analisada neste trabalho. Uma embarcação de suporte a plataformas de petróleo teve os dados de operação coletados por 6 meses. Observou-se que esta embarcação realiza operações com alto grau de transiência, o que tende a aumentar o consumo específico dos motores térmicos por operarem fora dos seus pontos ótimos. Um simulador foi criado para comparar as operações coletadas do navio com a de um sistema de geração energética contendo um armazenador de energia, neste caso, baterias de íons de lítio ligadas ao barramento que alimenta os motores elétricos de propulsão, absorvendo as cargas transientes da demanda navio, permitindo que os motores térmicos de geração de energia operassem de forma otimizada relacionada ao consumo. Foram sugeridas estratégias com a utilização da média simples e médias móveis de maneira a coordenar a potência dos motores na hibridização mantendo o seu comportamento mais estável e mais próximo da operação com menor consumo específico de combustível. Percebeu-se que, para as operações com maior transiência, em destaque àquelas com realização de posicionamento dinâmico da embarcação, a aplicação da hibridização foi mais eficiente, chegando a uma redução de consumo superando os 30%. Por fim, foi realizado um estudo de caso para a aplicação da hibridização em um mês típico de operação do navio. Após aplicação das simulações, foram obtidos os valores de redução de consumo de 45.701 litros/mês, representando uma economia de 22,58% do combustível do navio. Extrapolando a operação para os 10 anos da expectativa de vida útil do sistema, verificou-se a sua viabilidade financeira, com uma economia estimada de R\$2.761.317,43/ano atrelada à redução de consumo e de custos de manutenção.

Palavras-Chave

Eficiência Energética; Transição energética; Armazenamento de Energia, Bateria de Lítio

Abstract

Pinto, Marcus Vinícius Adorno Borges; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Hybridization of offshore vessels**. Rio de Janeiro, 2023,144p. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With a focus on industrial energy transition, particularly in the transportation sector, this study analyzes the application of hybridization as a means to optimize energy production in vessels. Data from a platform support vessel for oil were collected over 6 months. It was observed that this vessel conducts operations with a high degree of transience, which tends to increase the specific fuel consumption of thermal engines by operating outside their optimal points. A simulator was created to compare the vessel's collected operations with those of an energy generation system containing an energy storage unit—specifically, lithium-ion batteries connected to the bus powering electric propulsion motors, absorbing transient loads from the ship's demand and allowing thermal engines to operate optimally in relation to consumption. Strategies were suggested using simple averages and moving averages to coordinate engine power in hybridization, maintaining their behavior more stable and closer to operation with lower specific fuel consumption. It was noted that for operations with higher transience, particularly those involving dynamic vessel positioning, hybridization was more efficient, resulting in a consumption reduction exceeding 30%. Finally, a case study was conducted for the application of hybridization in a typical month of vessel operation. After applying the simulations, consumption reduction values of 45,701liters/month were obtained, representing a 22.58% fuel savings for the vessel. Extrapolating the operation for the system's 10-year expected lifespan, its financial viability was confirmed, with an estimated annual savings of R\$2,761,317.43 attributed to reduced consumption and maintenance costs.

Keywords

Energy Efficiency; Hybridization; Energy Storage; Battery

Sumário

1 MOTIVAÇÃO	20
1.1 OBJETIVO	21
2 FUNDAMENTAÇÃO	23
2.1 CONCEITOS SOBRE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA (MCI)	23
2.2 TIPOS DE OPERAÇÕES DE NAVIO DE APOIO OFFSHORE	28
2.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO DINÂMICO	30
2.4 SISTEMAS DE PROPULSÃO E DE GERAÇÃO DE ENERGIA	31
2.4.1 PROPULSÃO MECÂNICA	31
2.4.2 PROPULSÃO ELÉTRICA	35
2.4.3 PROPULSÃO HÍBRIDA	38
2.4.4 PROPULSÃO ELÉTRICA COM GERAÇÃO HÍBRIDA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	38
2.5 TECNOLOGIA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	40
2.5.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS BATERIAS DE LI-ION	42
2.5.2 CARACTERÍSTICAS DAS BATERIAS	43
2.6 ESTRATÉGIAS DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	47
2.6.1 SPINNING RESERVE	48
2.6.2 ENHANCED DYNAMIC PERFORMANCE (MELHORIA NA RESPOSTA DINÂMICA)	48
2.6.3 PEAK SHAVING	49
2.6.4 ESTRATÉGIA DE ZERO EMISSÃO	50
2.7 VARIÁVEIS ESTATÍSTICAS DE INTERESSE PARA UMA MÉDIA TEMPORAL	51
2.7.1 MÉDIA SIMPLES	52
2.7.2 DESVIO PADRÃO	52
2.7.3 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	52
2.7.4 MÉDIA MÓVEL	52
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	54
4 METODOLOGIA	59
4.1 DIVISÃO DA METODOLOGIA	59
4.2 DESCRIÇÃO DA EMBARCAÇÃO	59
4.3 AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS	61
4.3.1 DIFICULDADES ENFRENTADAS NO PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS	62
4.3.2 DIAGNÓSTICO DE OPERAÇÕES DO NAVIO	63
4.4 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FÁBRICA DOS MOTORES	64
4.5 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA	65
4.6 DEFINIÇÃO DO SIMULADOR	66
4.6.1 ENTRADA DOS DADOS DE CONFIGURAÇÃO DO SIMULADOR	66
4.6.2 CÁLCULO DA PENALIZAÇÃO DOS MOTORES	69

4.6.3 CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA	70
4.7 CÁLCULOS DO SIMULADOR	71
4.8 ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO COM A HIBRIDIZAÇÃO	72
4.8.1 CÁLCULO DA POTÊNCIA DO MOTOR E DA BATERIA	73
4.8.2 CÁLCULO DO STATE OF CHARGE (SOC)	76
4.8.3 CÁLCULO DO COULOMB RATE (CR)	77
4.8.4 CÁLCULO DO CONSUMO	78
4.9 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES	81
5 RESULTADOS	82
5.1 RESULTADO DO DIAGNÓSTICO DE OPERAÇÕES DO NAVIO	82
5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS DIAS PARA TRATAMENTO DOS DADOS DO NAVIO	84
5.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FÁBRICA DOS MOTORES	87
5.4 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA	89
5.4.1 CÁLCULO DA PENALIZAÇÃO DOS MOTORES	95
5.4.2 CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA	97
5.5 ANÁLISE DAS DIFERENTES OPERAÇÕES	98
5.5.1 ROV4YA. OPERAÇÃO COM DURAÇÃO DE 4 HORAS E USO DA ESTRATÉGIA DMS	98
5.5.2 STD2YA OPERAÇÃO COM DURAÇÃO DE 4 HORAS E USO DA ESTRATÉGIA DMS	102
5.5.3 NAVEG2NF OPERAÇÃO COM DURAÇÃO DE 3,5 HORAS E USO DA ESTRATÉGIA MM1000	105
5.5.4 NAVEG2NA OPERAÇÃO COM DURAÇÃO DE 4 HORAS E USO DA ESTRATÉGIA MM1000	108
5.5.5 PORTO START/STOP	112
5.6 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE HIBRIDIZAÇÃO	115
5.6.1 ROV4YA 1 HORA	115
5.6.2 STD2YA 4 HORAS	118
5.7 ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO COM MÊS TÍPICO	121
5.7.1 DEFINIÇÃO DO MÊS CARACTERÍSTICO	121
6 CONCLUSÃO	130
6.1. TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
APÊNDICE	141

Lista de Figuras

Figura 1: Emissões de CO ₂ devido a combustíveis fósseis e fatores industriais	20
Figura 2: Representação de um motor a combustão interna.	23
Figura 3: Representação do ciclo de ar padrão Diesel.	24
Figura 4: Curva característica de um MCI.	25
Figura 5: Mapa do comportamento de um motor diesel típico em estado permanente.	26
Figura 6: Exemplo de sistema de propulsão automotiva com tecnologia.	27
Figura 7: Navio OSV Viking Lady.	28
Figura 8: Perfil anual de operação de uma embarcação de apoio a operações <i>offshore</i>	28
Figura 9: Evolução da frota de apoio marítimo no Brasil.	30
Figura 10: Cargas externas aplicada em navios de posicionamento dinâmico.	30
Figura 11: Sistema de Propulsão Mecânica.	32
Figura 12: Propulsão acoplada mecanicamente ao MCI.	32
Figura 13: Mapa de eficiência com SFOC em g/kWh	33
Figura 14: Curva de emissão específica de NO _x em g/kWh.	33
Figura 15: Sistema de propulsão por passo controlável.	34
Figura 16 Curvas de Performance de um MCI.	34
Figura 17: Diferentes combinações de estratégias para uso de grupos geradores, visando melhor ponto de operação.	35
Figura 18: Propulsão elétrica.	36
Figura 19: Comparação de um motor gerando torque para atender a um gerador AC com o mesmo motor gerando torque para um gerador DC.	36
Figura 20: Escala de tempo do comportamento transiente de diferentes sistemas envolvidos no posicionamento dinâmico de uma embarcação.	37
Figura 21: Propulsão híbrida.	38
Figura 22: Geração híbrida com armazenamento de energia.	39
Figura 23 :Relação carga x tempo em uma operação convencional e com hibridização.	40
Figura 24: Representação do experimento realizado por Alessandro Volta para construção de uma pilha.	41
Figura 25: Ilustração do funcionamento de uma bateria Li-ion Fonte:[41]	42
Figura 26: Diferentes tipos de baterias e a relação de densidade energética e de potência.	43
Figura 27: Relação da Resistência Interna com o SOC para uma bateria de Lítio.	45
Figura 28: Relação da energia específica de baterias com a temperatura.	46

Figura 29: Evolução dos valores em \$/kWh para baterias Li-Ion. Valores reais em azul e previstos em roxo.....	46
Figura 30: Sistema compacto de armazenamento de energia numa embarcação. <i>Plug and Play</i>	47
Figura 31: Uso simultâneo da estratégia de melhoria de resposta dinâmica e <i>Spinning Reserve</i>	49
Figura 32: Aplicação de estratégia <i>Peak Shaving</i>	50
Figura 33: Aplicação da estratégia de zero emissão num navio de turismo.	51
Figura 34: Mapa de operação de um motor com as curvas de consumo específico variando com Torque e Rotação dos motores	51
Figura 35: Exemplo de utilização de médias móveis.	53
Figura 36: Exemplo de Embarcação do Tipo <i>Platform Support Vessel</i> ou Navio de Suporte a Plataformas.....	60
Figura 37: Diagrama do SGE do no navio objeto do estudo, evidenciando os 4 moto-geradores, barramento do sistema, além dos propulsores.....	61
Figura 38: Dashboard/painel de operações do navio.	63
Figura 39: Relação diária de operações do navio.	64
Figura 40: Painel para dados de potência dos motores.	66
Figura 41: Entrada da configuração do motor.	67
Figura 42: Dados de entrada da bateria.	68
Figura 43: Dados de entrada do sistema de refrigeração.	68
Figura 44: Dimensões de container da bateria.....	70
Figura 45: Gráfico relacionando potência do motor representado pela linha preta , da bateria em vermelho e da demanda em verde para a estratégia DMS em que o motor se mantém fornecendo uma carga estática enquanto as variações de potência são absorvidas pela bateria.	73
Figura 46: Gráfico com exemplo da energia acumulada na bateria durante uma operação simulada.	76
Figura 47: Gráfico com a variação do SOC para cada tipo de bateria analisada.	77
Figura 48: Variação do CR para diferentes tipos de baterias, de acordo com suas capacidades.	78
Figura 49: Exemplo da aplicação de diferentes estratégias para a utilização da hibridização.	80
Figura 50: Variação do SOC da bateria na estratégia <i>Start-Stop</i>	80
Figura 51: Dados de operações em julho.....	82
Figura 52: Dados de operações em agosto.	82
Figura 53: Dados de operações em setembro.	83
Figura 54: Dados de operações em outubro.	83
Figura 55: Dados de operações em novembro.	83
Figura 56: Dados de operações em dezembro.	84
Figura 57: Dados de operações acumulado de julho a dezembro.	84
Figura 58: Perfil diário de operação dos dias selecionados para análise.	85
Figura 59: Lista dos dias analisados com as respectivas operações.....	87
Figura 60: Curva Potência x FC através de dados do fabricante. $R^2 = 0,99$	88

Figura 61: Curva Potência x SFC através de dados do fabricante. $R^2 = 0,99$	88
Figura 62: Variação de Potência para a operação NAVEGAÇÃO 2NF do dia 05/08/2020.....	90
Figura 63:Variação SFC para a operação NAVEGAÇÃO 2NF do dia 05/08/2020.	90
Figura 64: Variação de Potência para a operação FUNDEADO 1NF do dia 05/08/2020.	91
Figura 65: Variação de SFC para a operação FUNDEADO 1NF do dia 05/08/2020.	91
Figura 66: Variação de Potência para a operação STAND BY 2YA do dia 26/08/2020.	92
Figura 67: Variação de SFC para a operação STAND BY 2YA do dia 26/08/2020.	93
Figura 68: Variação de Potência para a operação ROV 4YA do dia 25/07/2020.	94
Figura 69: Variação de SFC para a operação ROV 4YA do dia 25/07/2020.	94
Figura 70:Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =10,02%. 95	
Figura 71:Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =8,80%. ..	96
Figura 72:Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =4,60%. ..	96
Figura 73: Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =2,87%. .	96
Figura 74: Dados relacionado o CV com a diferença de consumo real e de fábrica.	97
Figura 75: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação ROV4YA.....	99
Figura 76:Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação ROV4YA.....	100
Figura 77:Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação ROV4YA.....	100
Figura 78:Potência líquida da bateria na operação ROV4YA com a estratégia DMS.....	101
Figura 79: Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação ROV4YA na estratégia DMS.....	102
Figura 80:Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação STD2YA.	103
Figura 81:Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação STD2YA.	103
Figura 82:Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação STD2YA.	104
Figura 83: Potência líquida da bateria na operação STD2YA com a estratégia DMS.....	104
Figura 84:Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação STD2YA na estratégia DMS.....	105

Figura 85: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NF.	106
Figura 86: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NF.	106
Figura 87: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NF.	107
Figura 88: Potência Líquida da bateria na operação NAVEG2NF com a estratégia MM1000.	107
Figura 89: Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação NAVEG2NF na estratégia MM1000.	108
Figura 90: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando apenas um motor na hibridização. .	109
Figura 91: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, , utilizando apenas um motor na hibridização.	109
Figura 92: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando apenas um motor na hibridização. .	110
Figura 93: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando dois motores na hibridização.	111
Figura 94: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando dois motores na hibridização.	111
Figura 95: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação PORTO.	112
Figura 96: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação PORTO.	113
Figura 97: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação PORTO.	113
Figura 98: Potência Líquida da bateria na operação PORTO.	114
Figura 99: Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação PORTO.	115
Figura 100: Comparação do comportamento do SGE sem a bateria e com as estratégias DMS, MM50, MM250 e MM1000 para a operação ROV4YA.	116
Figura 101: Consumo em Litros e consumo específico para as estratégias DMS, MM50, MM250, MM1000, adotadas na operação ROV4YA.	118
Figura 102: Comparação do comportamento do SGE sem a bateria e com as estratégias DMS, MM50, MM250 e MM1000 para a operação STD2YA.	120
Figura 103: Consumo em Litros e consumo específico para as estratégias DMS, MM50, MM250, MM1000, adotadas na operação STD2YA.	121
Figura 104: Percentual de operação do NAVIO em agosto 2020.	121
Figura 105: Percentual de operação do NAVIO em 2020 (julho a dezembro).	122
Figura 106: Gráfico da variação da quantidade de energia na bateria no período analisado.	127

Figura 107: Dados de entrada do simulador.	141
Figura 108: Potência dos motores com a estratégia DMS e 1 motor em operação.	141
Figura 109: Potência dos motores com a estratégia DMS e 2 motores em operação.	142
Figura 110: Cálculo das potências e energia da bateria.	142
Figura 111: SOC das diferentes baterias, de acordo com suas capacidades.	143
Figura 112: Dados de consumo coletados para o SGE do navio, na operação convencional, sem a hibridização.....	143
Figura 113: Consumos do SGE do navio, simulados com a hibridização.	144

Lista de Tabela

Tabela 1:Dados do motor CAT3512C fornecidos pelo fabricante. Fonte: [82]	65
Tabela 2: Propriedade dos materiais de composição do container. Fonte: [83]	71
Tabela 3: Tabela de incremento de temperatura para cálculo do calor de penetração. Fonte: [84]	71
Tabela 4:Operações realizadas pelo navio.	85
Tabela 5: Operações do NAVIO. Classificação de acordo com o CV.	89
Tabela 6:Dados dos geradores para a operação NAVEGAÇÃO 2NF do dia 05/08/2020.....	90
Tabela 7: Dados dos geradores para a operação FUNDEADO 1NF do dia 05/08/2020.	92
Tabela 8: Dados dos geradores para a operação STAND BY 2YA do dia 26/08/2020.	93
Tabela 9: Dados dos geradores para a operação ROV 4YA do dia 25/07/2020.	94
Tabela 10: Relação entre CV e penalização de consumo.....	97
Tabela 11: Dados de SOC, CR E Tempo de operação apenas com a bateria para a operação ROV4YA na estratégia DMS.	101
Tabela 12:Dados de SOC, CR E Tempo de operação apenas com a bateria para a operação STD2YA na estratégia DMS.....	105
Tabela 13: Dados de SOC, CR E Tempo de operação apenas com a bateria para a operação NAVEG2NF na estratégia MM1000.	108
Tabela 14: Dados de SOC, CR e Tempo de operação apenas com a bateria para a operação PORTO.....	114
Tabela 15: Dados de saída par as diferentes estratégias adotadas para a simulação com hibridização para uma operação em ROV4YA.....	117
Tabela 16: Coeficientes de Variação para as diferentes estratégias adotadas na operação ROV4YA.	118
Tabela 17: Médias das potências dos motores para as diferentes estratégias adotadas na operação ROV4YA.....	118
Tabela 18:Dados de saída par as diferentes estratégias adotadas para a simulação com hibridização para uma operação em STD2YA.	119
Tabela 19: Coeficientes de Variação para as diferentes estratégias adotadas na operação STD2YA.....	120
Tabela 20:Médias das potências dos motores para as diferentes estratégias adotadas na operação STD2YA.	120
Tabela 21: Operações coletadas para o mês de agosto de 2020.	123
Tabela 22: Avaliação do dia 01 de agosto na comparação dos consumos com e sem a aplicação da hibridização.....	125
Tabela 23: Dados de saída para uma das 7 simulações utilizadas para o mês típico na operação ROV4YA.....	125

Tabela 24: Simulação da análise financeira da instalação do sistema hibridizado.....	129
---	-----

Lista de abreviaturas

ABEAM Marítimo	Associação Brasileira das Empresas de Apoio
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
BSFC	<i>Break Specific Fuel Consumption</i> (Consumo Específico de Combustível de Bancada)
C	Comprimento
CH4	Metano
CO-2	Dióxido de Carbono
ConsProj	Consumo de Projeto calculado;
ConsReal	Consumo Real medido;
COP 21	Conferência de Paris
CPP controlável)	Controlable Pitch Propeller (Propulsor de passo controlável)
CR	C-rate
CT	Carga de Transmissão
CV	Coeficiente de Variação
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Direta)
Despad	Desvio Padrão
dif HD	Intervalo de tempo entre cada medição feita no navio
DifCons	Diferença Percentual entre Consumo de Projeto e Consumo Real.
DMS	Dados com média simples
DNV-GL	Empresa certificadora de embarcações
DoD	<i>Depth of Discharge</i> (Profundidade de Descarga)
DP	<i>Dynamic Positioning</i> (Posicionamento Dinâmico)
EFC Completos)	<i>Equivalent Fuel Cycle</i> (Equivalência de Ciclos Completos)
EnerBat	Energia da bateria
EOL	<i>End of Life</i> (Fim de vida)
ETL Carregar)	<i>Extract, Transform, Load</i> (Extrair, Transformar e Carregar)

FC	<i>Fuel Consumption</i> (Consumo de Combustível)
G1	Gerador 1
G2	Gerador 2
G3	Gerador 3
G4	Gerador 4
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
H	Altura
IMO	Organização Internacional Marítima
L	Largura
LD	Lado Direito
LE	Lado Esquerdo
Li-Ion	Ion de Lítio
MARPOL	Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios
MCI	Motores de Combustão Interna
MM50	Média móvel com ordem de 50 segundos
MM100	Média móvel com ordem de 100 segundos
MM250	Média móvel com ordem de 250 segundos
MM500	Média móvel com ordem de 500 segundos
MM1000	Média móvel com ordem de 1000 segundos
NOx,	Óxidos de nitrogênio
ONU	Organização das Nações Unidas
OSV	<i>Offshore Supply Vessel</i> (Navio de Suporte a Operações Offshore)
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative Controller</i> (Controlador Proporcional Integrado)
POT BAT	Potência gerada pela bateria
POT DIS	Potência dissipada pela bateria
POT REF	Potência de Refrigeração do sistema
POT SOL container	Calor gerado pela carga térmica de penetração no

POT(NET)BAT	Potência líquida da bateria
PSV Plataformas).	<i>Platform Supply Vessel</i> (Navio de Suporte a
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i> (Veículo Remotamente Operado)
SFC	<i>Specific Fuel Consumption</i> (Consumo Específico de Combustível)
SGE	Sistema de Geração de energia
SOC	<i>State of Charge</i> (Estado de Carga da Bateria)
SOH	<i>State of Health</i> (Estado de Saúde da Bateria)
SOx,	Óxidos de Enxofre
WD	Potência da demanda do sistema
WM	Potência dos motores
φ_T	Ineficiência da bateria

MOTIVAÇÃO

Na história da civilização, desde quando foi necessário ao homem manipular a oferta de recursos naturais para o crescimento da sociedade, nós passamos a influenciar o meio ambiente. De acordo com Ruddiman [1], existem evidências da interferência antropogênica nos valores de CH_4 e CO_2 atmosférico que datam 8000 anos atrás. No entanto, a partir da Revolução Industrial no século XVIII, as contribuições antropogênicas passaram a adquirir um papel significativo [2]. Somente em meados do século XX, após o final da 2ª guerra mundial, com a consequente criação da Organização das Nações Unidas (ONU), houve maior atenção aos problemas ambientais causados pela poluição derivada do consumo de combustíveis fósseis. Neste contexto, várias conferências mundiais foram realizadas para tratar das questões referentes à poluição. Dentre as mais relevantes, destaca-se a COP 21 onde foi estabelecido o Acordo de Paris que definiu como objetivo a redução de emissões mundiais para que o aquecimento global não ultrapasse 2°C em relação às temperaturas médias medidas antes da revolução industrial [3]. Em 2023, na Escócia, houve um novo acordo, conhecido como Acordo de Glasgow, que determinou um esforço para limitar o aumento em $1,5^\circ\text{C}$ das temperaturas globais até 2030, além da redução da emissão de CO_2 em 45% até 2030.

O gráfico da Figura 1 revela o acréscimo de CO_2 na atmosfera devido a fontes de origens fósseis e industriais. A acelerada elevação nos índices deste poluente atmosférico é, sem dúvida, alarmante.

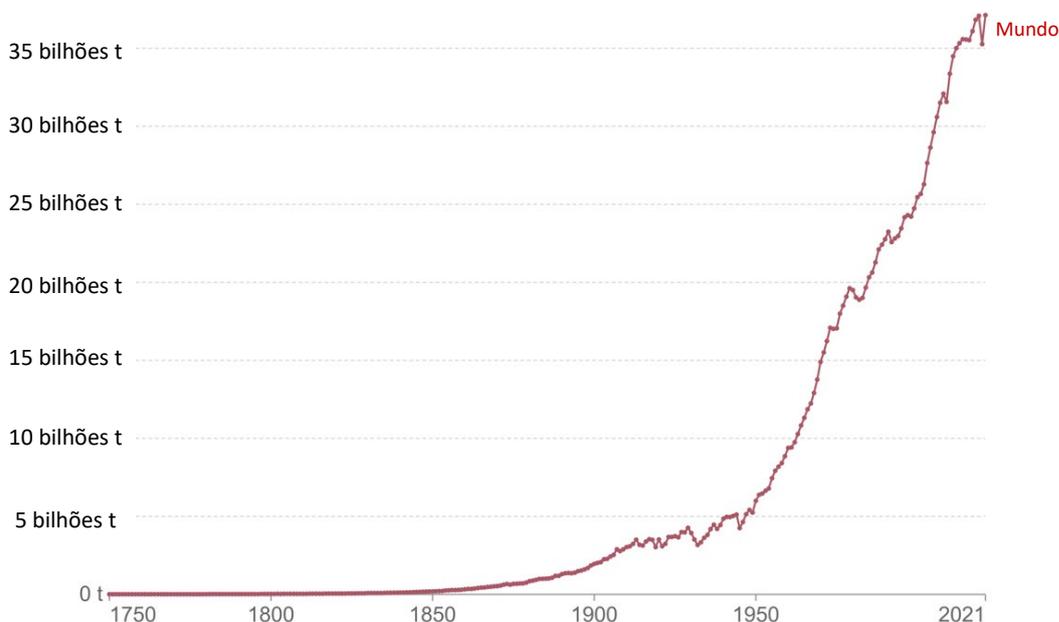


Figura 1: Emissão de CO_2 devido a combustíveis fósseis e fatores industriais. Fonte [4]

Destaca-se, neste contexto, o setor de transporte, com grande impacto na emissão de CO_2 antropogênico. Apenas em 2022, foram emitidos cerca de 8Gt de CO_2 , sendo relativo à 1/3 das contribuições industriais [5]. Neste sentido, a navegação tem grande importância, tanto pela sua relevância nas operações comerciais e industriais em âmbito global, sendo responsável por mais de 80% do comércio global, quanto no seu impacto na

poluição por gases [6]. Devido a tal importância, já em 1948, nos primeiros anos após a fundação da ONU, foi criada a Organização Internacional Marítima (IMO em inglês) sendo um órgão vinculado à ONU e responsável por regulamentar, nos mais variados aspectos, a navegação internacional[7]. Dentre outras questões relevantes, nas últimas décadas, a IMO tem se debruçado na atenção às questões referentes à poluição, tanto marinha quanto atmosférica, proveniente da navegação, principalmente após o lançamento da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL73/78) que tem o Brasil como país signatário[8]. De acordo com o quarto estudo sobre gases do efeito estufa realizado pela IMO, em 2020 [9], estima-se que a navegação internacional foi responsável pela emissão de 1 bilhão de toneladas de CO₂ em 2018, representando aproximadamente 2,89% das emissões totais antropogênicas naquele ano. Além do CO₂, outros poluentes provenientes da exaustão dos motores também impactam no meio ambiente de maneira relevante, tais como NO_x, SO_x, hidrocarbonetos não queimados, materiais particulados, dentre outros.

Fatos como estes pressionam cada vez mais as empresas operadoras de embarcações para que se tornem mais eficientes com menores taxas de emissões atmosféricas, buscando soluções de descarbonização. A principal demanda energética das embarcações está vinculada ao sistema de propulsão, no entanto, devido à diversidade de operações realizadas por estes equipamentos, outras demandas devem ser levadas em conta, por exemplo, a utilização de guindastes e outras operações específicas no setor de exploração de petróleo. Para suportar esta demanda energética, ao longo dos anos, foram desenvolvidas diferentes formas de geração e transformação de energia aplicadas às embarcações. Como será visto à frente, cada uma destas formas possui suas vantagens e desvantagens e, dependendo da aplicação, podem ou não ser as mais viáveis. De maneira a usufruir das vantagens dos vários sistemas de geração, reduzindo consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões dos motores, pode-se utilizar sistemas híbridos de energia.

Sistemas híbridos de geração são aqueles em que há mais de uma fonte de fornecimento de potência para o equipamento de interesse, buscando, como já citado, retirar as vantagens de cada sistema, nas suas faixas ótimas de operação, ou seja, utilizando cada sistema da maneira mais eficiente. Eles buscam direcionar as condições de carga desfavoráveis, como cargas severas ou flutuações de corrente de descarga para um sistema de armazenamento de energia mais robusto[10]. Este modelo, já bastante utilizado em aplicações automotivas, tem se mostrado muito eficiente para a melhoria do rendimento dos motores, principalmente quando a aplicação necessita de variações constantes na velocidade de rotação dos equipamentos ou na potência requerida. A hibridização com armazenamento de energia se vale, principalmente da possibilidade de gerir de forma mais eficiente o consumo da energia gerada. Com o armazenamento em baterias, por exemplo, é possível manter as condições mais favoráveis do sistema de geração primário de energia, ou seja, aquelas em que há menor consumo e emissões, e liberar para o sistema a quantidade de energia ideal para o suprimento das cargas, sem que os motores tenham que variar suas condições de operação. De acordo com Kalikatzarakus et al. [11], sistemas de fornecimento de potência híbrido tem se tornado realidade também para aplicações marítimas devido ao avanço na tecnologia das baterias, aumentando a sua densidade de potência.

1.1

Objetivo

Neste trabalho, são analisados dados coletados de uma embarcação de suporte a plataformas de petróleo a fim de levantar os perfis operacionais dela, além do comportamento do sistema de geração de energia (SGE) quanto aos parâmetros de potência e consumo. Posteriormente, confecciona-se um simulador para comparar as diferenças entre a operação real do navio, como o SGE atual instalado nele e operações simuladas com este mesmo navio tendo instalado um sistema de hibridização com armazenamento

energias por baterias de Ion de Lítio ou Li-Ion. Através do simulador, são analisadas diferentes estratégias para o gerenciamento da energia do sistema híbrido e, por fim, obtém-se as diferenças de consumo anuais do navio, baseado em seu perfil de operação. Ao final é realizado um estudo de viabilidade financeira para a aplicação desta tecnologia.

A contribuição deste trabalho está na análise das diferentes estratégias de hibridização, baseadas na aplicação de média simples e médias móveis, para definir a potência gerada pelo SGE nas condições simuladas, além da criação de um simulador fundamentado em dados reais do navio, analisando as diferentes operações realizadas por ele e definindo o melhor perfil estratégico para o uso do sistema hibridizado. Por fim, pretende-se avaliar a viabilidade financeira da aplicação do sistema de hibridização em uma embarcação, tendo como base o seu perfil operacional em um mês típico, extrapolando os resultados para o período de vida útil do sistema.

2

FUNDAMENTAÇÃO

2.1

Conceitos sobre Motores a Combustão Interna (MCI)

Para entender melhor como a utilização de baterias otimiza a eficiência de sistemas de geração de energia em aplicações navais, é necessário compreender alguns aspectos funcionais dos motores de combustão mais utilizados nas embarcações. Máquinas térmicas são, por definição, dispositivos que permitem transformar calor em trabalho[12]. Dentre estes dispositivos, incluem-se os MCI em que há uma combustão de um fluido ativo e, desta combustão, é gerado trabalho. Estes motores são utilizados, dentre outras funções, para o transporte nas mais diversas situações, sejam eles rodoviários, marítimos ou aéreos. A Figura 2, a seguir, exibe um esquema de um exemplar de MCI, destacando o cilindro, onde ocorre a combustão do fluido ativo, além do pistão e mecanismo de manivela, necessários para a transmissão do trabalho.

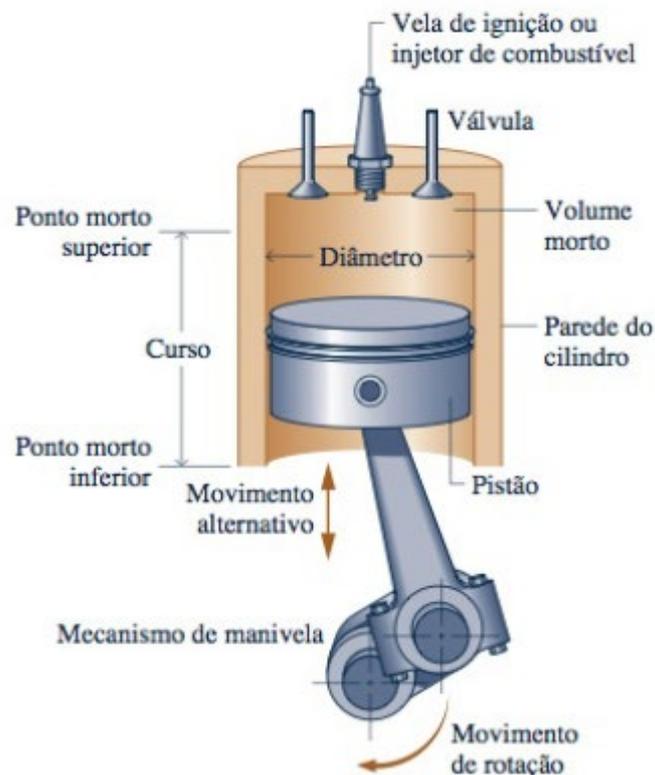


Figura 2: Representação de um motor a combustão interna. Fonte: [13]

A operação desses motores pode ser representada pelos ciclos teóricos de potência. Neste trabalho, destaca-se o ciclo padrão a Ar Diesel, comumente utilizado em aplicações marítimas que têm como característica operarem com rotações mais baixas do que os que operam de acordo com ciclo Otto, como alguns motores automotivos, além de possuírem dimensões maiores, em geral.

No seu ciclo teórico, destacam-se os seguintes processos que podem ser visualizados na Figura 3:

1-2: Processo de compressão isentrópica do ar, com o pistão indo do ponto morto inferior ao superior, de acordo com esquema da Figura 2;

2-3: Processo de transferência de calor ao fluido de trabalho a pressão constante, caracterizado pela combustão do fluido;

3-4: Expansão isentrópica, com conseqüente geração de trabalho;

4-1: Rejeição do calor a volume constante, que na prática refere-se à descarga e admissão no motor real.

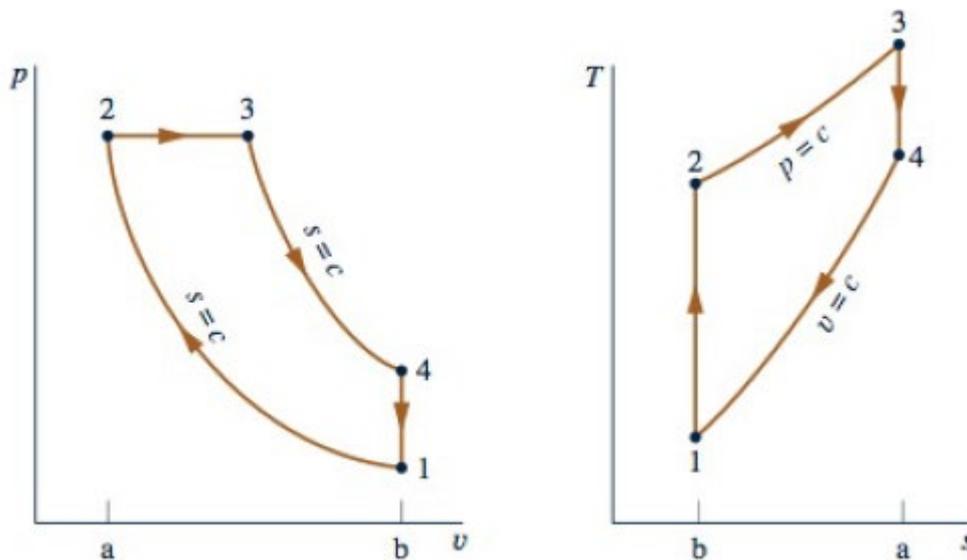


Figura 3: Representação do ciclo de ar padrão Diesel. Fonte: [13]

Para este tipo de motor, algumas características são bastante relevantes para o seu dimensionamento, bem como análise da sua eficiência em serviço. Dentre elas, citam-se:

- Torque do motor: está relacionado com a capacidade do motor em vencer as resistências ao giro;
- Potência Efetiva: é a potência medida no eixo do motor, ou seja, é a quantidade de trabalho por unidade de tempo que o motor produz no seu eixo [12];
- Consumo Específico: é a relação entre o consumo de combustível do motor e a potência efetiva gerada [12]. Este parâmetro pode ser dado em [L/kW] e indica a eficiência de consumo do motor para gerar potência efetiva.

Uma característica intrínseca aos motores de combustão interna (MCI) é que seu comportamento varia de acordo com a carga a qual é solicitado. Há pontos de maior ou menor eficiência para cada motor, que em geral é controlado pela rotação dele. A Figura 4 mostra a curva característica de um MCI. Nela, pode-se observar que os valores de torque, no destaque em azul, são altos para baixas rotações mais que tendem a diminuir com o

aumento da rotação. Já para a potência efetiva, em vermelho, ela tende a aumentar com o acréscimo da velocidade do motor. Por fim, o consumo específico de combustível, mostrado em verde, tem um comportamento peculiar, onde o seu menor valor, ou seja, a posição de maior eficiência com relação ao consumo, está situado num valor médio de rotação do motor. Este é o comportamento característico de um motor MCI e deve ser levado em consideração quando se quer encontrar o seu ponto ótimo de operação.

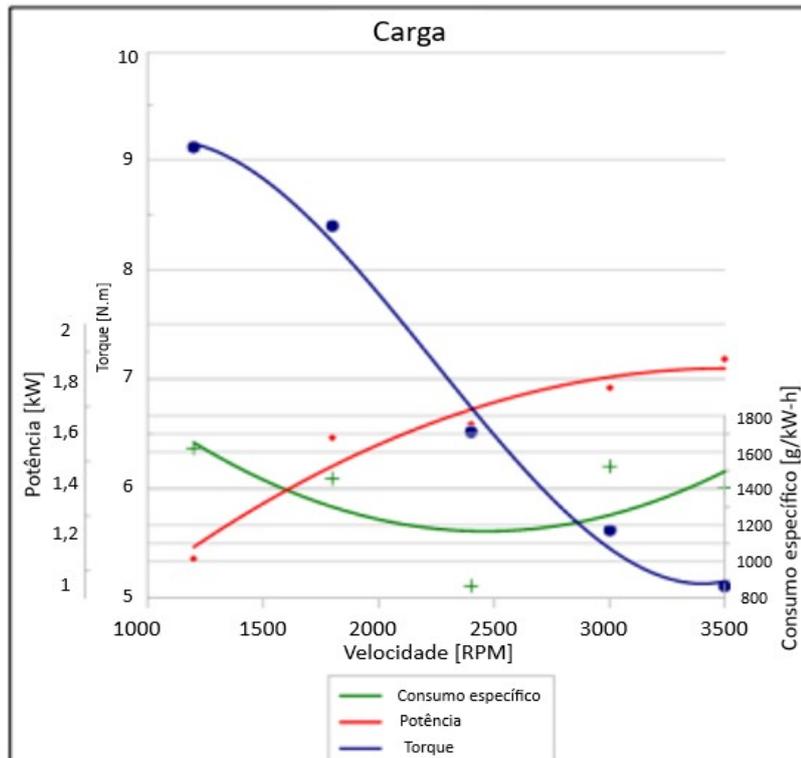


Figura 4: Curva característica de um MCI. Fonte: [14]

Outro exemplo de mapeamento de um motor pode ser visualizado na Figura 5, onde, para um motor diesel típico em aplicações navais, é possível verificar que, de acordo com a carga e rotação aplicada no equipamento, há variação no seu consumo específico de combustível para um ensaio de bancada (BSFC, do inglês *Break Specific Fuel Consumption*), evidenciada pelas linhas demarcadas no mapa da esquerda e também no nível de emissões de poluente Óxido de Nitrogênio (Nox), com as respectivas linhas de emissões no mapa da direita.

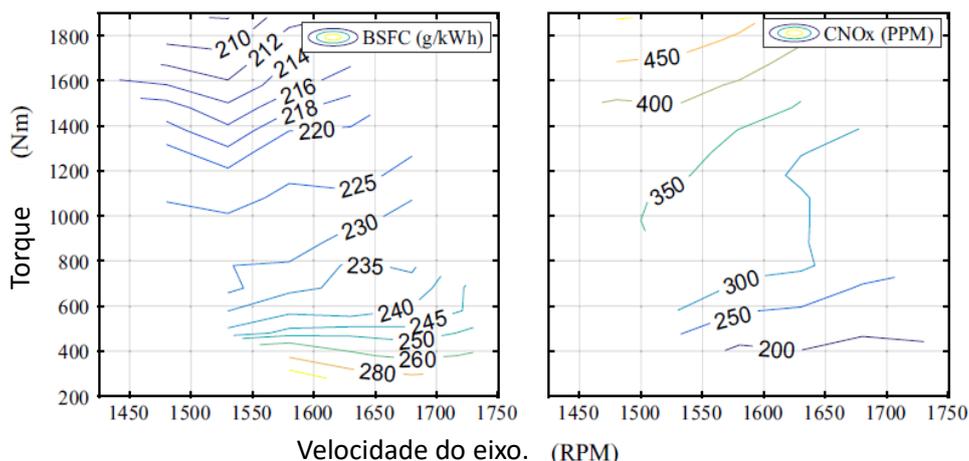


Figura 5: Mapa do comportamento de um motor diesel típico em estado permanente. À esquerda, os valores do consumo específico de bancada (BSFC, do inglês *Break Specific Fuel Consumption*) e à direita a emissão do poluente Óxido de Nitrogênio em partes por milhão por volume (CNOx), ambos variando com o Torque e Velocidade de rotação do motor. Fonte:[15]

Como visto na Figura 5, em um MCI típico há faixas de operação mais eficientes, no entanto, em operações que sejam necessários longos períodos de comportamento transiente do motor, ou seja, operações com variações constantes de velocidade de rotação e carga do motor, dificilmente haverá a possibilidade de utilizar o equipamento no seu ponto ótimo de eficiência por um longo período.

A hibridização com armazenamento na geração de energia, isto é, utilização de diferentes fontes para fornecimento de potência, com a possibilidade de armazenar energia quando necessário, surge como uma alternativa para aumentar a eficiência. O sistema de armazenamento possibilita a absorção das cargas transientes, mantendo o motor em sua faixa otimizada de rotação, com baixas variações, estando sempre operando próximo às suas melhores configurações. Este tipo de tecnologia já é bastante disseminado na indústria automotiva, como visto na Figura 6, possibilitando que estratégias de gestão no uso das fontes de energia sejam executadas de maneira a otimizar a eficiência dos sistemas geradores.

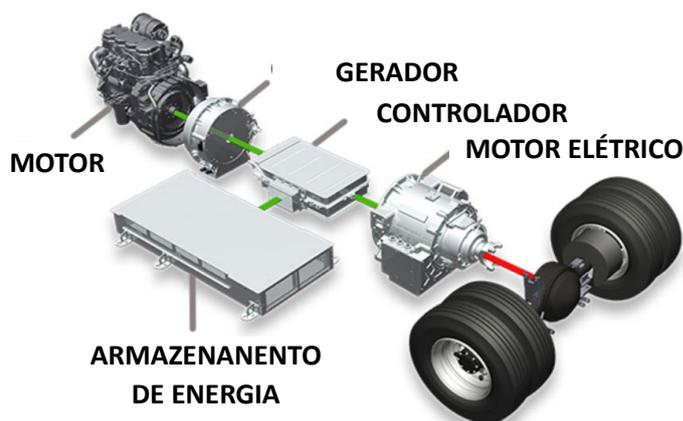


Figura 6: Exemplo de sistema de propulsão automotiva com tecnologia. Neste exemplo, o Motor de combustão interna alimenta um gerador elétrico que fornece energia para um motor elétrico. Com o auxílio do sistema de armazenamento de energia e da estratégia de controle, é possível que a potência demandada pelo motor elétrico seja suprida, mantendo o MCI nas suas condições otimizadas de operação, quanto a consumo e emissões. Fonte: [16]

Já há também algumas aplicações marítimas desta tecnologia, como citado anteriormente, mostrando inclusive resultados bastante promissores no ganho de eficiência, principalmente, no que tange a redução de consumo de combustível. Estudos recentes relatam a possibilidade de redução do consumo dos motores entre 10% e 35% com a utilização de hibridização com armazenamento de energia, devido à possibilidade de aplicação de estratégias de gestão da energia, atreladas, principalmente, à busca pela manutenção dos MCI nas suas condições mais favoráveis de funcionamento, durante toda a operação do navio [17].

Além da redução do consumo e conseqüente diminuição nas emissões, a hibridização ainda traz outras vantagens em suas aplicações marítimas, tais como:

- Menor gastos com manutenção;
- Maior manobrabilidade devido à resposta mais rápida das baterias em relação ao MCI;
- Diminuição da necessidade instalada do MCI no navio;
- Operação de *back-up*;
- Redução de vibrações e ruídos;
- Possibilidade de operação apenas com a bateria (*all electric*) em áreas com maiores restrições ambientais quanto a emissões.

Como exemplo, tem-se a embarcação Viking Lady (Figura 7), um navio do tipo OSV (*Offshore Platform Vessel*) que, segundo a fabricante do sistema de armazenamento instalado no mesmo, alcançou uma redução de 15% no seu consumo, além de diminuição de emissões de poluentes como NO_x e CO_2 . [18].



Figura 7: Navio OSV Viking Lady. Fonte: [18]

2.2

Tipos de Operações de Navio de Apoio Offshore

Uma das aplicações navais que tem o perfil de operação bastante favorável para utilização de hibridização é a de apoio a operações *offshore*. O gráfico da Figura 8 mostra o perfil anual de horas em cada tipo de operação de uma embarcação de suporte a operações *offshore*.

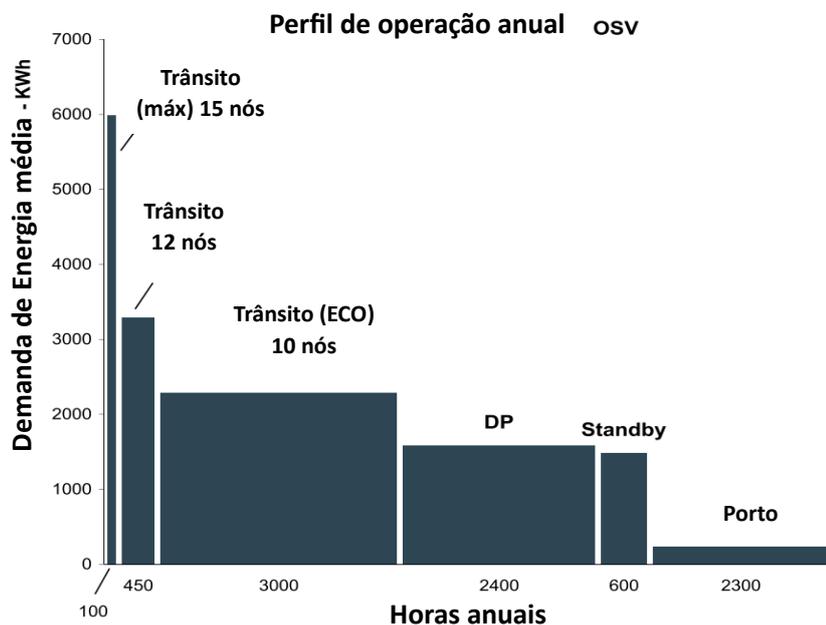


Figura 8: Perfil anual de operação de uma embarcação de apoio a operações *offshore*. Fonte: [19]

De acordo com a IMO [19], em cerca de 27% das horas anuais de operação (2400 horas), estes tipos de embarcações estão operando em posicionamento dinâmico (DP na sigla em inglês, *Dynamic Positioning*) em alto mar, o que requer constantes mudanças de velocidade e direção dos seus propulsores para que os navios se mantenham posicionados devido aos efeitos externos das ondas, ventos e correntes marítimas. Embarcações que possuem a capacidade de se manterem posicionadas fixamente em alto mar exclusivamente através de seus propulsores são denominadas de dinamicamente posicionadas. Devido à

criticidade das operações realizadas, esses tipos de navios demandam maior garantia de segurança no fornecimento de energia, principalmente para os propulsores.

Nas embarcações convencionais que executam DP, as operações são realizadas com redundância no sistema de geração de energia para prevenir uma queda do fornecimento de potência, caso um deles venha a falhar. A IMO define 3 tipos de classes para embarcações que realizam posicionamento dinâmico. A classe DP1 refere-se a navios com redundância limitada dos seus sistemas ligados à geração de energia e propulsão. Estas embarcações são utilizadas em operações com baixo risco operacional. Para os navios da classe DP2, que possuem sistema de redundância mais robusto, possibilitam a manutenção do posicionamento dinâmico, mesmo com falhas parciais dos sistemas. Por fim, as embarcações da classe DP3 têm redundância total do sistema de propulsão e são utilizadas nas situações mais críticas com maior exigência de segurança operacional. Nas operações *offshore*, os tipos mais comuns utilizados são os de classe DP2 e DP3, que, como já citado, devem ser construídos de tal forma que o sistema de geração de energia possua redundâncias a fim de permitir a operação contínua do mesmo, caso haja falha em um deles[20]. Logo, o número de motores nestas embarcações é maior que o necessário, desconsiderando as questões de segurança operacional, e eles rodam a baixa carga e baixa eficiência, pois estão fora dos seus pontos ótimos de operação[21]. Os motores convencionais destas embarcações operam constantemente em regime transiente e distantes dos seus pontos ótimos. A aplicação do armazenamento de energia surge, então, para gerir a demanda de potência dos moto-geradores de forma a absorver as variações de carga, mantendo os mesmos em regime constante ou próximo a isso. Além disso, o sistema de armazenamento de energia propicia uma operação mais segura, absorvendo eventuais falhas nos motores, eliminando, desta forma, a necessidade operacional da utilização excessiva de MCIs.

O Brasil possui uma vasta frota de navios operando com apoio marítimo, ou seja, suporte logístico às operações de perfuração e produção de petróleo. Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Apoio Marítimo (ABEAM),[22] houve um salto no número destas embarcações, sendo menos de 200 em 2008, época das primeiras descobertas do petróleo nas regiões do “pré-sal” brasileiro, passando para 420 em novembro de 2023, com 368 embarcações de bandeira brasileira e 52 de bandeira estrangeira (Figura 9). Ainda de acordo com a ABEAM, o campo de atuação deste setor é de cerca de 7400 km sentido norte-sul do Brasil, afastando-se em torno de 300 km da costa brasileira. Desta forma e por tudo que foi exposto até agora, o estudo e aplicação da tecnologia de hibridização com armazenamento de energia mostra-se com grande potencial para a redução dos custos com combustíveis, além da diminuição considerável das emissões. Num cenário cada vez maior de pressão para operações mais eficientes e com menor impacto ambiental, a aplicação desta tecnologia insere-se de forma bastante oportuna para o setor de apoio naval a operações de plataformas.

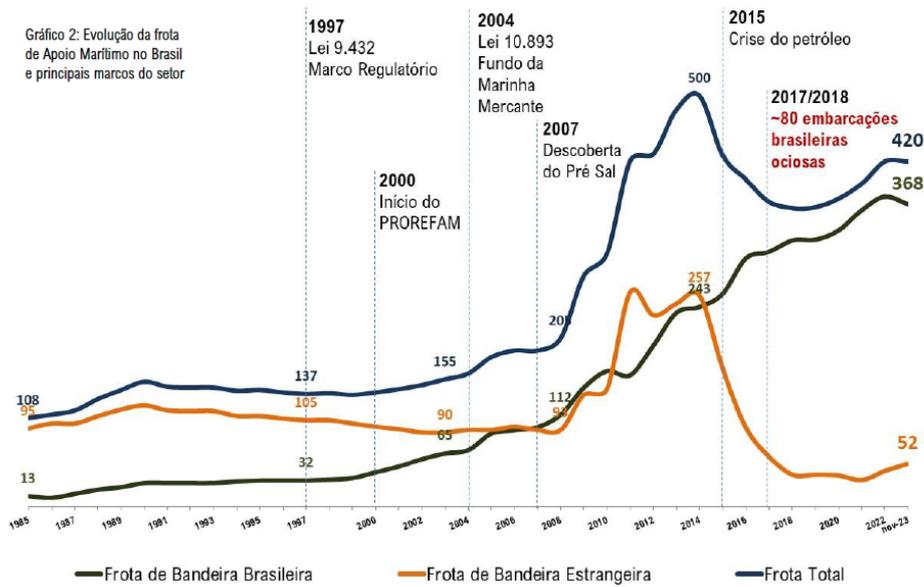


Figura 9: Evolução da frota de apoio marítimo no Brasil. Fonte: [22]

2.3

Sistema de Posicionamento Dinâmico

Nas operações *offshore* em águas profundas, o posicionamento dinâmico através dos propulsores da embarcação tem se tornado cada vez mais importante[23]. Uma embarcação no mar está sujeita às forças do vento, das ondas e das correntes, assim como às forças geradas pelo sistema propulsivo[24]. A relação entre estas solicitações é a grande responsável pelas cargas transientes demandadas ao sistema de geração de energia destas embarcações. Através de equipamentos como giroscópios e sistemas de referência de posição, além de sensores verticais, são calculadas as forças necessárias para manter a embarcação corretamente posicionada. Como visto na Figura 10, há 3 graus de liberdade horizontais (caturro, deriva e guinada) que são controlados pelos propulsores. Observa-se que, apesar da embarcação estar parada em relação a um ponto georreferenciado, ela varia constantemente a sua velocidade quando consideramos a corrente marítima.

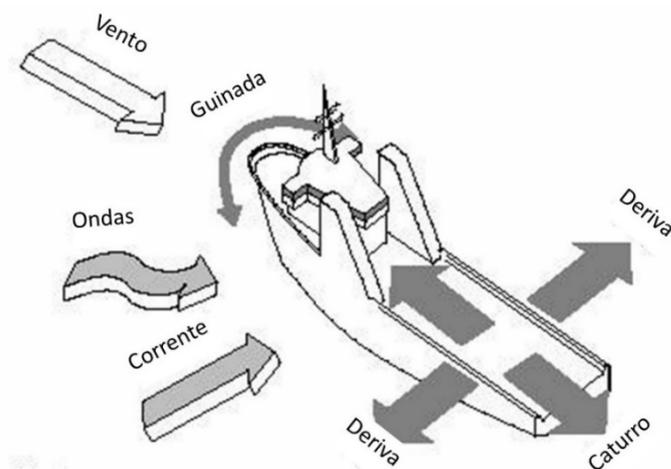


Figura 10: Cargas externas aplicada em navios de posicionamento dinâmico. Fonte: [24]

Segundo Gainza [25], a relação entre a potência requerida e a velocidade da embarcação é cúbica, ou seja, para qualquer mudança de velocidade nos propulsores, a potência solicitada ao sistema de geração será proporcional ao cubo desta variação, ocasionando modificações bruscas e constantes no ponto de operação dos motores primários. Estas características aliadas ao risco relacionado às operações de aproximação a instalações *offshore* como plataformas, por exemplo, demandam um sistema de propulsão que possuam respostas rápidas às solicitações do sistema de navegação, além de comandos precisos e seguros[26]. De acordo com Sørensen [27], esse sistema de posicionamento foi utilizado pela primeira vez na década de 1960, usando uma ferramenta simplificada de controle PID (Controlador proporcional integrado). Ainda de acordo com Sørensen [27], a configuração básica dos sistemas de posicionamento dinâmico de uma embarcação pode ser subdividida da seguinte forma: Sistema de geração (motor primário e gerador); Sistema de distribuição de energia; Transformadores de tensão, motores elétricos de velocidade variável; Sistema secundário de segurança para geração de energia para os componentes de automação.

2.4

Sistemas de Propulsão e de Geração de Energia

Como visto no tópico anterior, a variação de potência necessária devido à demanda do sistema de posicionamento dinâmicos é bastante considerável. Nas embarcações, há diferentes formas de produção de energia primária e, por consequência, potência. As primeiras fontes de energia para propulsão das embarcações foram provenientes de força animal, com homens movimentando remos ou até mesmo embarcações sendo rebocadas por animais de cargas nas margens de rios. Outra forma de propulsão utilizada nos primórdios do desenvolvimento marítimo, e usada até os dias atuais, deu-se através do aproveitamento das forças da natureza, como exemplo das caravelas que eram movidas com o auxílio de velas. Já, após o advento do motor a vapor, a transformação da energia térmica em energia cinética foi a principal maneira de fornecimento de energia. Atualmente, há outras formas mais modernas e complexas de fornecimento de potência, como a nuclear, solar. No entanto, a grande maioria das embarcações ainda utilizam MCI como fonte de geração energética. Apesar desta geração ser em sua grande maioria proveniente de MCIs, a propulsão possui ainda hoje diferentes configurações, englobando a propulsão elétrica, mecânica e híbrida. A seguir veremos alguns aspectos relevantes deste tipo de propulsão, suas vantagens e desvantagens.

2.4.1

Propulsão Mecânica

Este tipo de propulsão é formado, na sua maioria, por um MCI gerando potência para o propulsor, transmitida através de um sistema de engrenagens mecânicas, ou, em alguns casos, diretamente por um eixo, sem relação de transmissão[28]. Nestas embarcações, as cargas solicitadas para serviços auxiliares, todos aqueles que não estejam envolvidos na movimentação do navio, são fornecidas também pelos motores que se conectam a geradores elétricos, como representado na Figura 11.

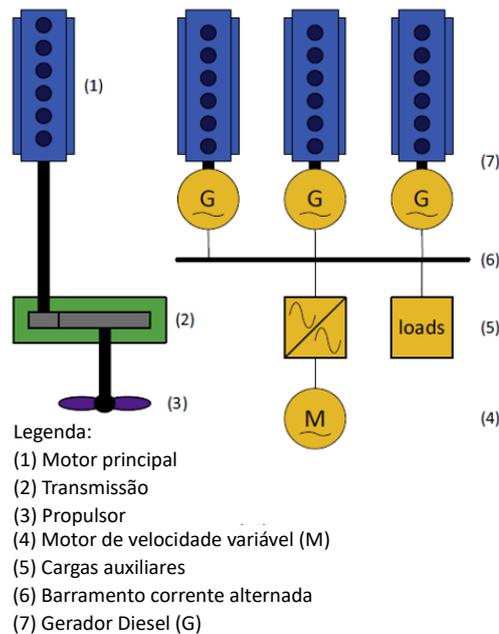


Figura 11: Sistema de Propulsão Mecânica. Fonte: [28]

A Figura 12, a seguir, exemplifica este tipo de propulsão evidenciando um MCI acoplado a um sistema de engrenagens ligado pelo eixo ao impelidor ou hélice.

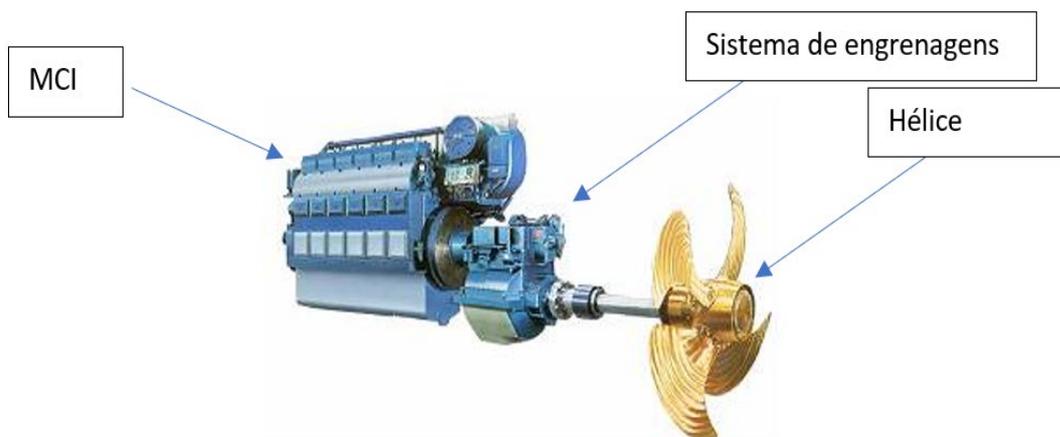


Figura 12: Propulsão acoplada mecanicamente ao MCI. Fonte: [29]

Dentre os tipos de impelidores, há os de passo constante, sendo, o passo, a representação do avanço teórico que o hélice dá em uma volta completa em torno do seu eixo. Neste caso, como não há reversão nos hélices, é necessário que o motor seja reversível para permitir as manobras necessárias da embarcação. Um dos desafios deste tipo de tecnologia é adequar o conjunto motor-gerador, transmissão, propulsor e resistência da embarcação nas melhores condições de operação do MCI[28]. Para isso, são obtidos envelopes de operação para os motores que mostram as suas faixas de funcionamento, assim como a relação de consumo do motor e em alguns casos, também das emissões, dependendo da potência desejada e velocidade de rotação. Na Figura 13, observamos um envelope para o consumo específico de combustível (SFC na sigla em inglês) de um motor. Já na Figura 14, o mesmo motor tem o seu envelope para as faixas de emissões de NO_x . É interessante observar que as faixas de operação para o mínimo de consumo não coincidem com a faixa para a minimização da emissão no NO_x . Em geral, os fabricantes dos motores

possuem tais mapas, mas quando eles não estão disponíveis, pode-se produzir estas curvas experimentalmente.

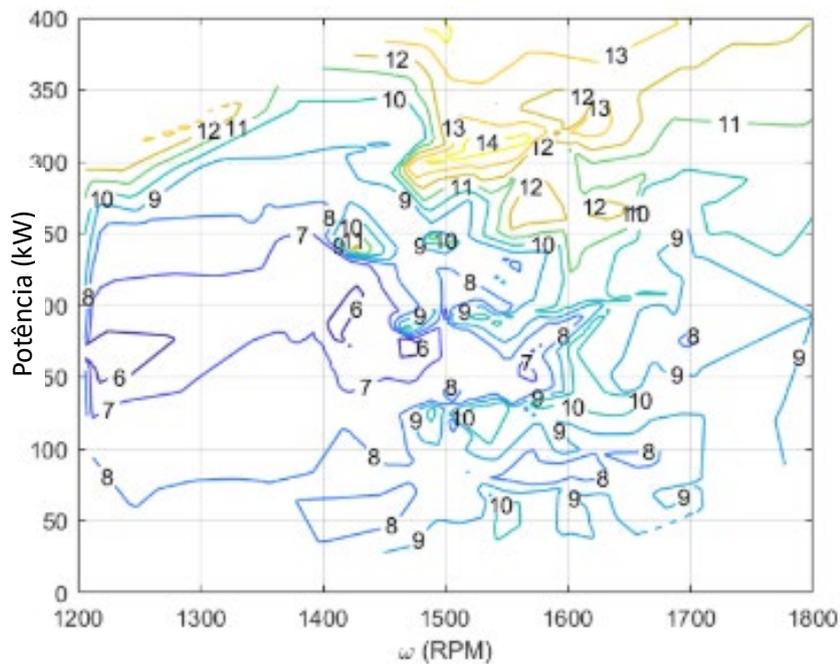


Figura 13: Mapa de eficiência com SFOC em g/kWh. Fonte:[30]

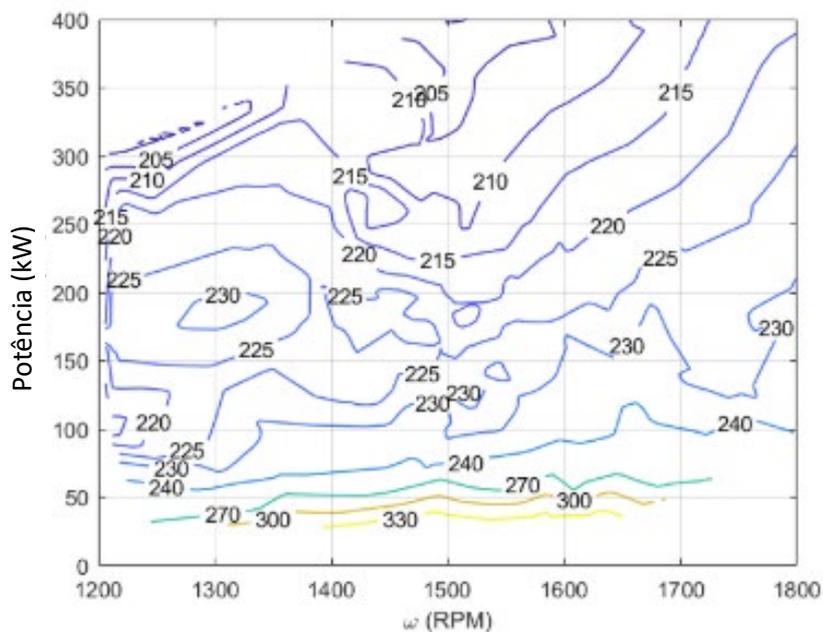


Figura 14: Curva de emissão específica de NOx em g/kWh. Fonte: [30]

Outra forma de propulsão bastante comum em navios é a de passo controlável ou *Controlable pitch propeller* (CPP). Nesse caso, há mais um grau de liberdade a ser controlado que é o passo do propulsor, sendo modificado pelo ângulo dos hélices (Figura 15). Este tipo de impelidor tem como vantagem o fato de não necessitar de motores com

inversão para a realização de manobras ou paradas, já que a variação do ângulo das pás pode cumprir este papel.

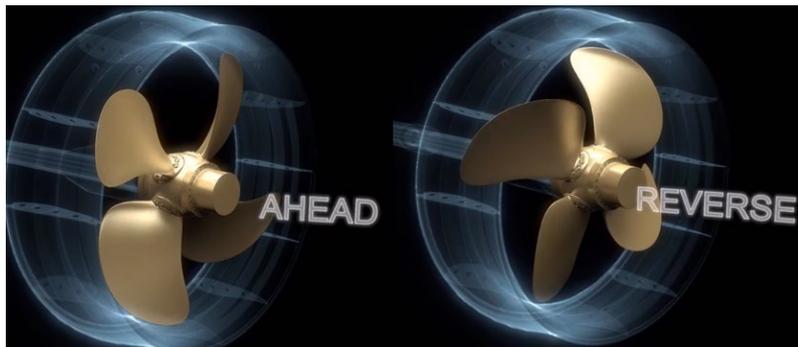


Figura 15: Sistema de propulsão por passo controlável. Fonte: [31]

Como visto anteriormente, uma das principais formas de análise do comportamento do motor é realizada através dos seus envelopes ou mapas de operação (Figura 16). Estas curvas, que variam de acordo às especificações de cada motor, relacionando consumo, emissões, eficiência e faixas de operação com potência e velocidade de rotação, são as referências para o dimensionamento do sistema de geração de potência das embarcações com MCI.

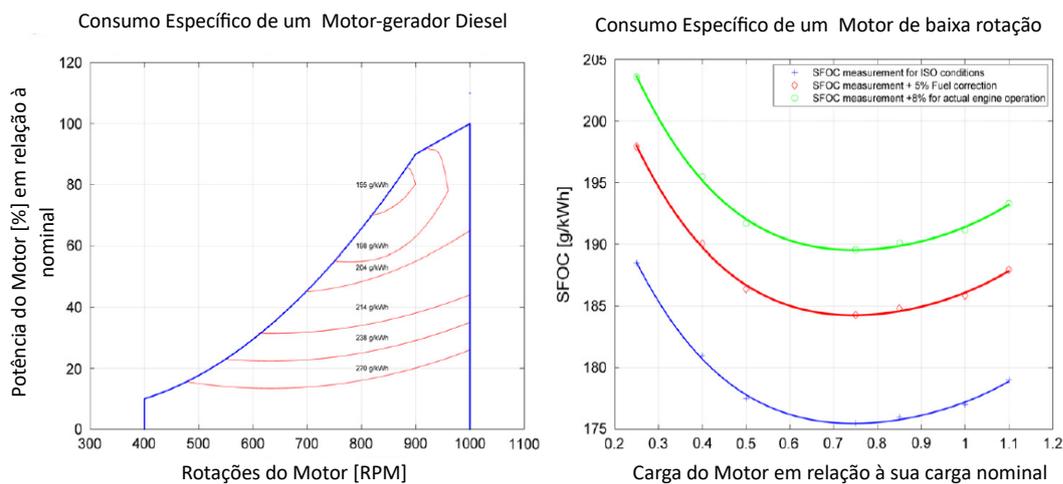


Figura 16 Curvas de Performance de um MCI. Fonte: [32]

As emissões dos poluentes podem ser relacionadas com o consumo específico do MCI e, desta forma podem ser deduzidas através da carga do motor [32]. Esses gráficos são de grande importância no entendimento do comportamento dos motores e são um dos principais aliados dos projetistas e pesquisadores na busca de melhoria de eficiência das embarcações. Diversos estudos têm sido realizados em busca de estratégias de utilização destes motores de forma a aumentar suas eficiências. Como já citado anteriormente, as embarcações que necessitam realizar posicionamento dinâmico devem operar com mais de um MCI para geração de energia, trabalhando em redundância por questões de segurança operacional. A fim de melhorar a eficiência da operação nestas situações, algumas estratégias podem ser adotadas, ora visando minimizar o consumo do grupo gerador de potência, ora minimizar a emissão de poluentes, como no caso do estudo realizado por Miyazaki & Sorensen [30] visto na Figura 17. No referido estudo, três motores foram analisados. No gráfico (a) a estratégia visava exclusivamente a redução do consumo de combustível nos motores. No gráfico (b), o objetivo era a redução das emissões de NO_x e no gráfico (c), fez-se uma mescla entre os dois objetivos anteriores. As variáveis w_1 e w_2 são os pesos utilizados na análise sendo o primeiro relativo à minimização do consumo e o

segundo, minimização da emissão de NO_x . P_1 e P_2 representam as potências dos geradores e P_L , a carga demandada.

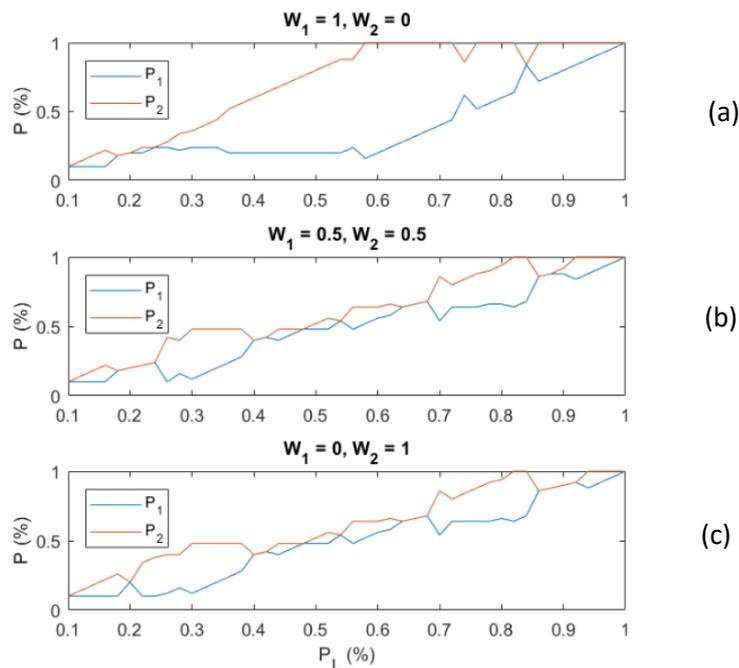


Figura 17: Diferentes combinações de estratégias para uso de grupos geradores, visando melhor ponto de operação. Fonte: [30]

Alguns dos principais benefícios da propulsão mecânica relatados pela fabricante de baterias Corvus [28] são:

- Maiores eficiências ocorrem entre 80% e 100% da velocidade máxima (melhor ponto de operação para motores diesel);
- Só 3 estágios de conversão de energia (Motor / Transmissão / Propulsor), ou seja, baixa taxa de perda;
- Baixo custo de aquisição do motor diesel, comparado com outras tecnologias.

Como desafios a serem vencidos na propulsão mecânica, o mesmo autor cita:

- Manobrabilidade limitada pelo envelope de operação do motor (pode ser reduzido pelo uso do passo variável);
- Apresenta grandes cargas estáticas e dinâmicas, o que aumenta a necessidade de manutenção do motor;
- Tem baixa eficiência de combustível e alta emissão com velocidade abaixo de 70% de velocidade nominal;
- Baixa disponibilidade da propulsão mecânica, pois qualquer componente que falhe no trem de força causa perda de propulsão;
- Maiores índices de ruído devido à transmissão mecânica.

2.4.2

Propulsão Elétrica

Na propulsão elétrica, o MCI fornece potência de eixo a um gerador de alta voltagem. Este gerador, então, transmite energia elétrica para os motores elétricos. Além do gerador, outros componentes que, em geral, constam no sistema são transformadores de

tensão e inversores de frequência, dependendo do tipo do motor, que pode ser de corrente contínua (DC na sigla em Inglês, *Direct Current*) ou corrente alternada (AC na sigla em Inglês, *Alternating Current*). A Figura 18 mostra um arranjo típico deste tipo de propulsão:

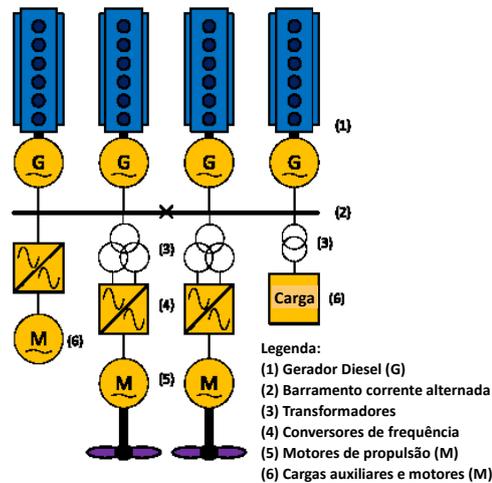


Figura 18: Propulsão elétrica. Fonte: [28]

No caso dos sistemas que operam com corrente alternada, a frequência do gerador deve ser fixada em 50Hz ou 60Hz, o que acaba limitando os MCIs que alimentam os geradores, pois eles também precisam operar com velocidade de rotação fixa, e, como visto na Figura 13, ao alterar a potência fornecida, sem a possibilidade de variar a velocidade de rotação, o motor não consegue manter-se numa faixa de melhor eficiência de operação. Já a utilização de corrente direta (DC) não possui a limitação da velocidade de rotação. Neste caso, os sistemas que operam em DC podem ter a sua demanda de potência variada e manter as rotações nos pontos ótimos de operação do motor. Essa vantagem dos sistemas DC em relação aos AC é maior quando o motor está em baixas rotações, como visto na Figura 19.

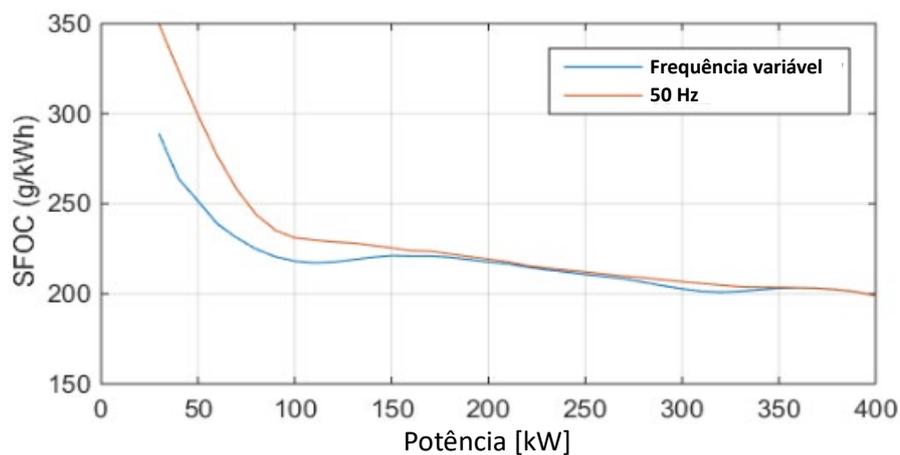


Figura 19: Comparação de um motor gerando torque para atender a um gerador AC com o mesmo motor gerando torque para um gerador DC. Fonte: [33]

Através do gráfico apresentado na Figura 19, é possível observar a variação do consumo específico de combustível (SFOC na sigla em inglês, *Specific Fuel Oil Consumption*) com a potência para a operação de um MCI em duas situações distintas. Na primeira, representado em vermelho, ele alimenta um gerador de corrente AC de 50Hz. Já na segunda, mostrado na linha azul, ele fornece energia para um gerador com corrente contínua DC. Percebe-se que, nos menores valores de potência (até 150kW), o consumo

específico é menor no uso do gerador DC ou de frequência variável. Já para potências maiores, quando o MCI se aproxima da sua faixa otimizada de operação, a diferença entre os consumos específicos nos dois casos é consideravelmente menor, havendo uma tendência de equalização do SFOC para ambos.

Uma das características dos motores elétricos é que as respostas aos comandos são muito mais velozes que nos sistemas puramente mecânicos. De acordo Zohrabi et al. [34], oscilações em sistemas elétricos podem ocorrer após uma variação significativa nos seus parâmetros operacionais e em certas condições como reconfigurações do sistema, falhas em baterias ou outras falhas. No entanto, Garcia [35] mostra, na Figura 20, que o tempo de resposta dos componentes elétricos como geradores, disjuntores (*Breakers*) e motores de impulsão elétricos (*Thruster drive*) é muito menor que dos componentes mecânicos e que, por isso, esses comportamentos transientes podem ser desconsiderados quando a análise é feita, com foco nos sistemas mecânicos.

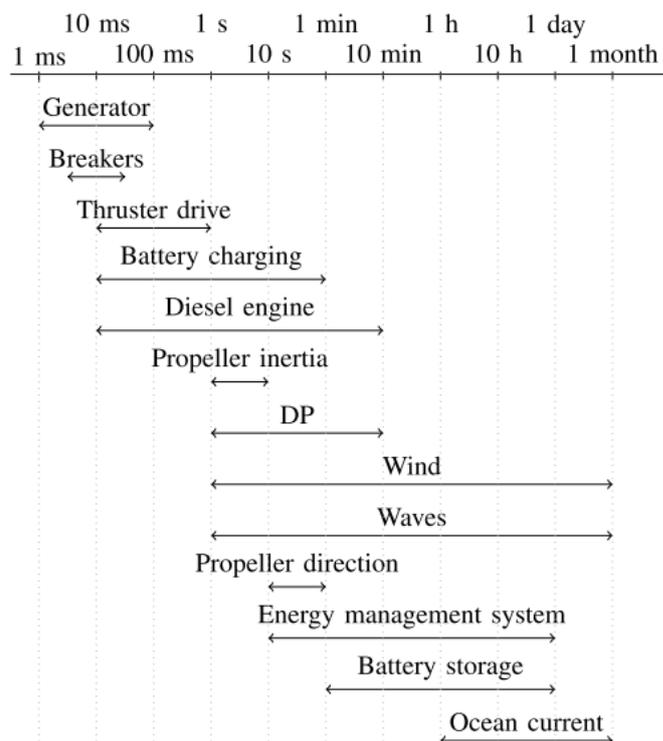


Figura 20: Escala de tempo do comportamento transiente de diferentes sistemas envolvidos no posicionamento dinâmico de uma embarcação. Fonte: [35]

Segundo Geertsma et al. [28], estas são as seguintes vantagens para este tipo de propulsão:

- Menor emissão de NOx já que a propulsão elétrica, em geral, é alimentada por um número maior de motores de menor capacidade, que, por isso, operam em rotações maiores;
- Menor custo de manutenção, pois não há transmissão mecânica e por consequência, menor quantidade de partes móveis;
- Menor nível de ruído atrelado também à menor quantidade de partes móveis;
- Menor necessidade instalada, pois não há grandes eixos de transmissão.

Dentre as desvantagens, pode-se citar:

- Incremento de perdas associadas a equipamentos eletrônicos como inversores e transformadores;

- Em casos de propulsores com corrente contínua, necessidade de inversores para gerar tanto corrente contínua quanto alternada, já que a maioria dos equipamentos de serviço (cerca de 80%) operam com corrente contínua; [21]
- Em caso de operações que exijam redundância de motores, eles devem operar em velocidades menores o que diminui bastante a eficiência.

2.4.3

Propulsão Híbrida

O modelo de propulsão híbrida usa as vantagens dos dois anteriores, onde o motor mecânico é utilizado nas operações em alta velocidade, em que há maior eficiência e o motor elétrico é utilizado nas operações de menor velocidade, pois não há perdas de eficiência significativas para este tipo de geração quando a velocidade de operação diminui (Figura 21).

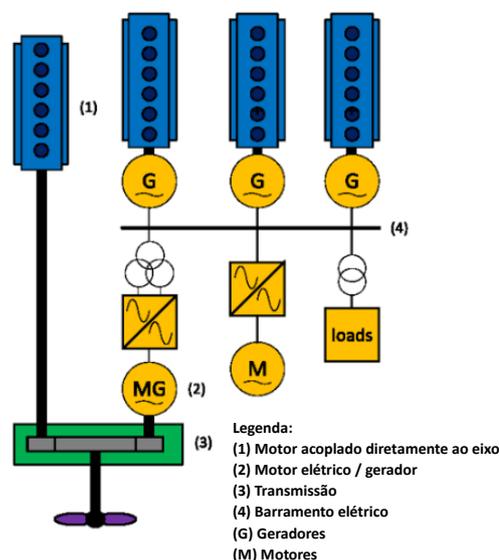


Figura 21: Propulsão híbrida. Fonte: [28]

2.4.4

Propulsão Elétrica Com Geração Híbrida e Armazenamento de Energia

Derivado da indústria automotiva, que já possui tecnologia estabelecida neste tipo de aplicação, a hibridização com armazenamento de energia surge como uma forma de otimizar o gerenciamento da geração energética (Figura 22). Esta tecnologia tem a possibilidade de gerar vários benefícios, dentre eles, pode-se citar, de acordo com Lhomme & Trovão [36]:

- Redução do consumo acima de 15% por ano;
- Redução de horas de operação dos motores entre 1500h a 4000h por ano;
- Melhor resposta de manobra nos navios;
- Menor possibilidade de *black-out* na embarcação;
- Diminuição do percentual de utilização do motor em baixas rotações com ganho de eficiência.

Há diferentes estratégias para a utilização de sistemas de armazenamento juntamente com a geração de energia. A escolha da estratégia está diretamente ligada ao objetivo, seja ele: redução de consumo, aumento da segurança operacional, diminuição do impacto ambiental, dentre outros. De acordo com Geertsma et al.[28], o uso de armazenamento possibilita o fornecimento de potência elétrica, além de permitir que um ou mais motores à combustão interna possam ser desativados ao invés de operarem em cargas parciais nas faixas de operação de maior emissão de CO₂ e NO_x. Outra possibilidade é a realização de operações “zero emissão” (potência fornecida apenas pelas baterias com o MCI desligado) em áreas mais sensíveis aos efeitos da poluição ambiental [37]. Nesta forma de hibridização, com o auxílio do sistema de armazenamento, há a possibilidade de recarregar o armazenador, tanto através de fontes externas, enquanto a embarcação está no porto, quanto pelos MCIs, quando o navio se encontra fora das zonas de restrições ambientais, na situação em que estes podem operar em altas rotações, mais próximas dos seus pontos de máxima eficiência. A grande vantagem deste sistema está no fato dos motores poderem operar numa faixa de máxima eficiência de forma contínua ou próximo a isso, como se a solicitação de potência externa fosse constante, já que as principais flutuações de carga serão absorvidas pelo sistema de armazenamento, promovendo o nivelamento da potência nos MCIs.

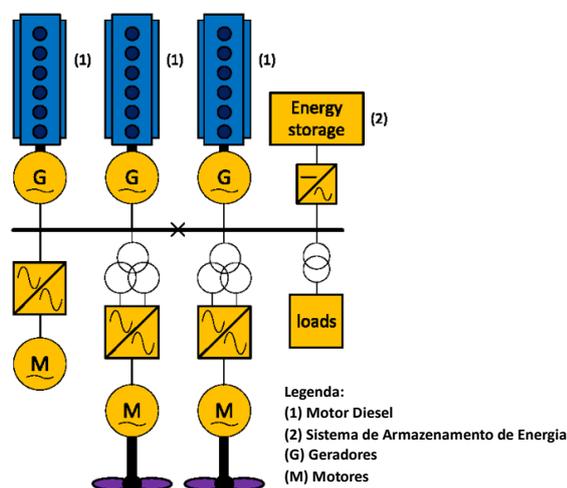


Figura 22: Geração híbrida com armazenamento de energia. Fonte: [28]

Um exemplo deste tipo de geração pode ser visto pela Figura 23, fornecida através de Garcia [36]. Nela, evidencia-se este tipo de operação, onde a geração de energia de um navio é produzida por dois MCIs acoplados a geradores, denominados de G1 e G4. É possível observar na Figura 23 o comportamento do sistema de geração convencional (sem o auxílio do banco de baterias) com os motores G1 em azul e G4 em vermelho (representados na faixa intermediária do gráfico). Observa-se que ambos os motores variam constantemente os seus pontos de operação, além disso, eles funcionam fornecendo potência numa faixa entre 200 kW a 400 kW, muito abaixo do seu ponto de máxima eficiência que está em torno de 600 kW. Esta utilização dos motores em paralelo, bem abaixo dos pontos ótimos de eficiência, é uma restrição de segurança operacional numa embarcação operando em DP, pelos riscos inerentes de um *black-out* de fornecimento de energia à própria embarcação e seu entorno. Ainda nesta mesma figura, observa-se a operação híbrida com o motor G4 mostrado em roxo e o sistema de armazenamento representado em azul claro. Percebe-se que apenas um motor está funcionando e em rotações mais elevadas, com menores variações. Neste caso, o motor G1 pode ser desligado, já que o sistema de armazenamento absorve a maior parcela transitente de demanda externa de potência, além de proporcionar uma fonte alternativa de fornecimento de potência no caso da falha do motor G4, garantindo dessa forma a segurança operacional. É importante salientar, no gráfico, que a linha de potência da bateria aparece negativa em

alguns instantes. Estes são os momentos em que a bateria passa a ser recarregada. Este tipo de hibridização enfrenta alguns desafios. De acordo com Geertsma et al. [28], ainda não foram criadas estratégias de controle bem desenvolvidas para aplicações de hibridização com armazenamento de energia em operações marítimas. Já Miyazaki [38] cita que a análise mais aprofundada das estratégias de uso dos sistemas de armazenamento devem ser realizadas. Ainda há, portanto, oportunidades de desenvolvimento de tais estratégias que maximizem as reduções de consumo e emissões, além de maiores estudos acerca da utilização correta dos sistemas de armazenamento de energia.

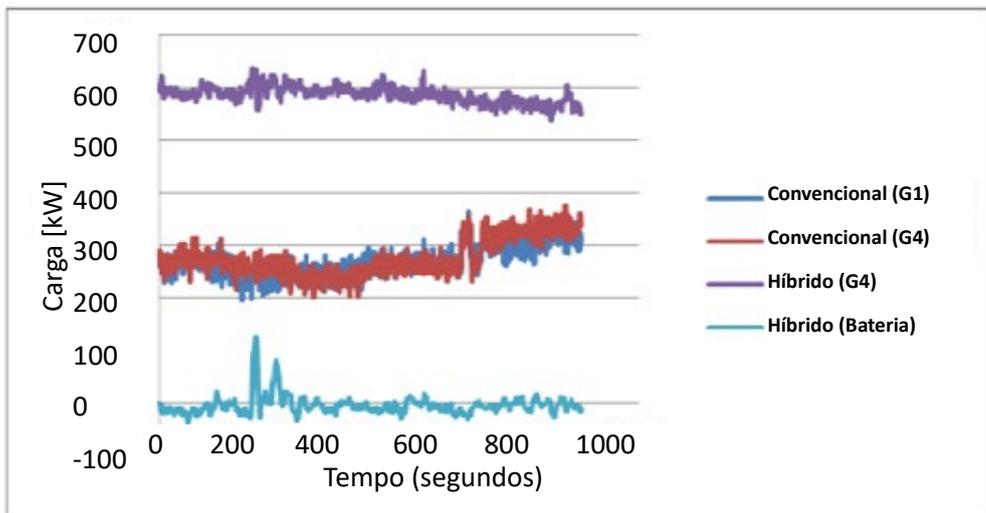


Figura 23 :Relação carga x tempo em uma operação convencional e com hibridização. Fonte: [36]

2.5

Tecnologia de Armazenamento de Energia

Pilhas galvânicas são, em sua essência, equipamentos formados por dois eletrodos, que através da diferença de suas propriedades químicas, em especial, suas eletronegatividades, possuem a capacidade de gerar corrente elétrica [38]. A utilização de pilhas elétricas remete o início do século XIX, sendo o primeiro físico a realizar experimentos relacionados às pilhas elétricas, Galvani. No entanto, apenas após novos experimentos realizados por Alessandro Volta, as interpretações dos fenômenos foram realizadas corretamente [39]. A Figura 24 demonstra o experimento realizado por Volta. Para realizar seu estudo, ele empilhou alternadamente discos de Zinco e Cobre, separando estes componentes por papel embebidos de uma solução de ácido sulfúrico e percebeu que, ao ligar um fio metálico às extremidades, surgia corrente elétrica. Este fenômeno foi explicado devido à diferença de potenciais elétricos entre os elementos envolvidos na pilha.

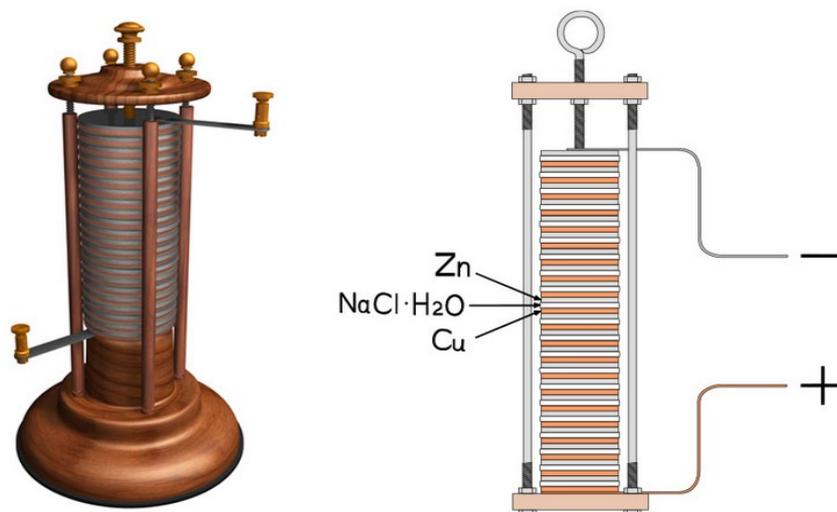


Figura 24: Representação do experimento realizado por Alessandro Volta para construção de uma pilha. Fonte: [39].

Desde os primórdios de sua utilização, um dos objetivos principais das pilhas elétricas permanece sendo a busca por maior densidade energética [40], ou seja, maior capacidade de armazenamento de energia por massa, obtendo desta forma a miniaturização deste equipamento essencial para muitas atividades da modernidade. Nesta busca pela otimização das pilhas, muitos elementos foram adicionados às baterias, destacando-se dentre eles: Chumbo-ácido, Li-íon, NiCd e NiMH [40]. Atualmente, as baterias de Ions de Lítio ou Li-íon vêm, cada vez mais, se destacando pelas suas características, que apresentam inúmeras vantagens, como será visto a seguir. Este tipo de bateria é composto basicamente por um cátodo, um ânodo, o eletrólito, um separador e um coletor de corrente [41]. A Figura 25 mostra um exemplo de constituição comum deste tipo de bateria. Neste exemplo, o óxido de Lítio é usado como cátodo e o grafite, como ânodo. No processo de carregamento da bateria, uma fonte externa com maior potencial elétrico força a extração dos íons do cátodo em direção ao ânodo. Nesta situação, os Íons de Lítio se depositam nas estruturas em grade do grafite. Ao mesmo tempo, elétrons circulam pelo eletrodo do cátodo em direção ao ânodo. No processo de descarga, o contrário ocorre, ou seja, tanto os íons de Lítio quanto os elétrons percorrem o caminho inverso ao anterior. Este processo ocorre analogamente ao fenômeno da respiração, com a troca de íons para dentro e para fora dos eletrodos [42].

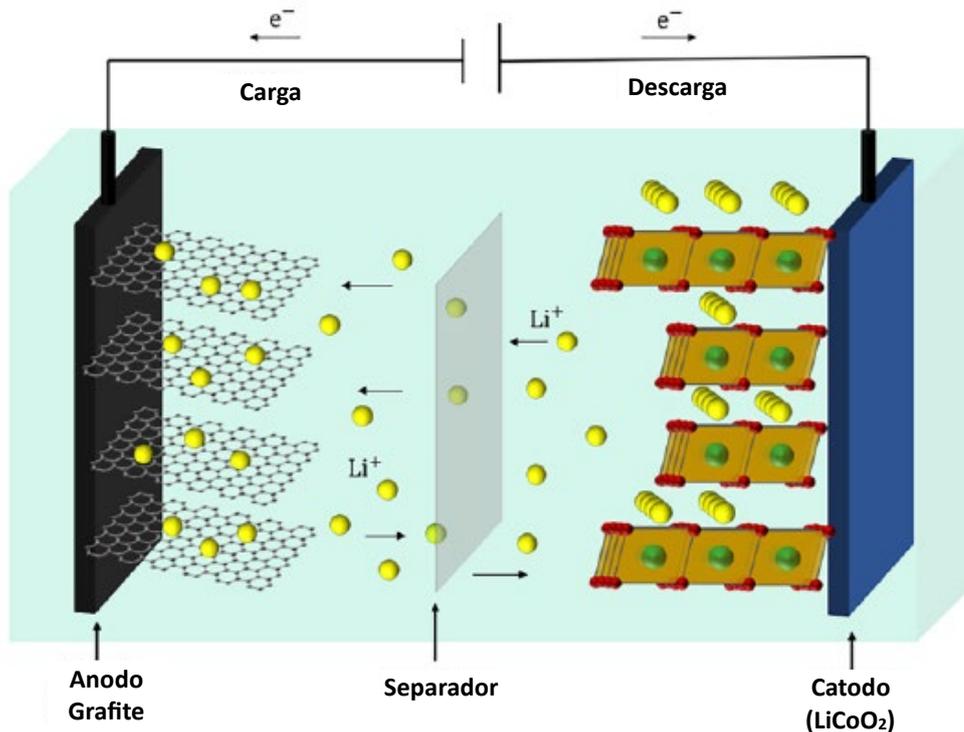


Figura 25: Ilustração do funcionamento de uma bateria Li-ion Fonte:[41]

2.5.1

Vantagens e Desvantagens das baterias de Li-Ion

Estas baterias possuem uma série de vantagens em relação às de tecnologias diferentes. Dentre elas, podemos citar: melhor combinação entre densidade energética (capacidade de armazenar energia por unidade de massa da bateria), densidade de potência (capacidade de fornecer potência por unidade de massa da bateria), ciclagem (número de ciclos de cargas e descargas de uma bateria em sua vida útil) [41][43]. De acordo com Miguel [40] as baterias de Li-Ion possuem como principais vantagens sua alta densidade energética, baixa taxa de autodescarga e baixa manutenção, não sendo necessário realizar descargas periódicas, além de não possuírem efeito memória. Segundo Ibrahim & Ilinca [44] as baterias de íon de lítio possuem alta eficiência de ciclo (relação entre a energia que entra e a que sai da bateria por ciclo). O autor informa que, para estas baterias, a eficiência é superior a 90%.

A Figura 26 evidencia a alta faixa de abrangência e a boa relação entre densidade de energia e de potência das baterias de íon de lítio em destaque em amarelo, quando comparadas às outras tecnologias.

Dentre as desvantagens, Miguel [40] cita a necessidade de um circuito de proteção, limitando a tensão e corrente da bateria, alto custo de produção e processo de envelhecimento da bateria, que ocorre mesmo quando a bateria não está em uso. Segundo Franchi [43], as células de lítio podem se tornar instáveis caso saiam da região de operação segura, necessitando de um sistema de gerenciamento para evitar que elas saiam destas faixas de operação segura.

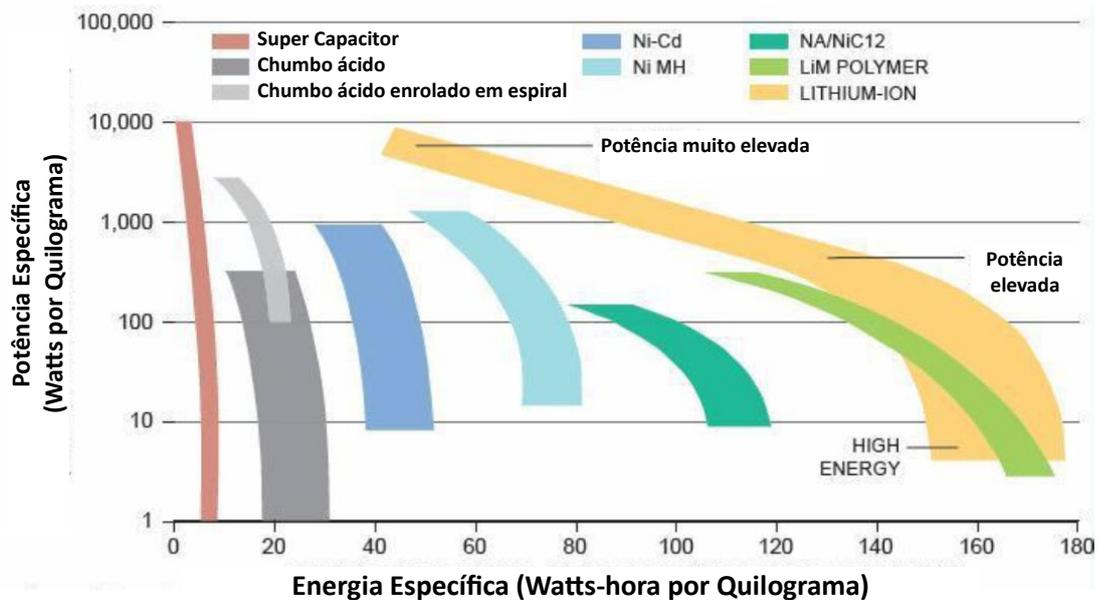


Figura 26: Diferentes tipos de baterias e a relação de densidade energética e de potência.
Fonte: [45]

2.5.2

Características das Baterias

Diversas são as características de interesse em baterias. A seguir, são relatadas algumas das principais:

- Classificação da bateria quanto à possibilidade de recarga:

Há duas diferentes classificações para baterias quando à possibilidade de recarga ou não delas: As baterias que não possuem a condição de serem recarregadas são definidas como baterias primárias. Elas não permitem que reações químicas reversíveis possam ocorrer [46]. Em contrapartida, aquelas que permitem reações químicas reversíveis são conhecidas por baterias secundárias, sendo este o caso das baterias de Li-Ion.

- Estado de Carga ou *State of Charge* (SOC):

Esta característica indica a quantidade de energia acumulada ou carga que a bateria possui. De acordo com Helgesen [47], é a razão entre a energia total disponível na bateria e a sua capacidade, tipicamente expressa em porcentagem. Conhecer o SOC da bateria é de grande importância para otimização da vida útil destes equipamentos como será visto mais à frente.

- Estado de Vida ou *State of Health* (SOH):

Esta variável indica o estado da bateria relacionada a sua vida útil. Ela diz respeito às condições da bateria e a sua capacidade de desenvolver um determinado desempenho, quando comparada a uma bateria nova[45]. Diferente de outras baterias em que o SOH é dado em função do tempo de seu uso, nas baterias de Li-Ion, o SOH está atrelado ao número de ciclos de carga e descarga que ela possui. Como em aplicações de hibridização com armazenamento de energia, as baterias são parcialmente carregadas e descarregadas, não há uma maneira direta de definir o número de ciclos que ela possui. No entanto, existe uma forma de calcular um número de ciclos equivalentes que na sigla em inglês significa *Equivalent Full Cycles* (EFC)[48]. Uma forma de estimar o número de ciclos é realizada por Peralta et al. [49] em que é feita a mensuração da seguinte forma:

O número de ciclos é dado dividindo-se a quantidade total de energia que percorreu a bateria em kWh pela diferença entre as cargas da bateria no SOC máximo e mínimo determinado, também dados em kWh. Por exemplo, para uma bateria definida para operar entre o SOC de carga mínima em 20% e máxima em 80%, faz-se o cálculo do número de ciclo da seguinte forma dada pela eq. (1), a seguir:

$$\text{N}^\circ \text{ de ciclos} = \frac{\text{Energia total que passou através da bateria [kWh]}}{(\text{SOC}_{80\%} - \text{SOC}_{20\%}) [\text{kWh}]} \quad (1)$$

Desta maneira, a relação entre o número de ciclos encontrado pela fórmula acima e o número de ciclos total teórico para o fim da vida útil da bateria fornece o SOH da bateria.

Segundo Cruz et al. [50], para baterias de Li-Ion, é comumente definido que o fim da vida ou *End of Life* (EOL) é alcançado quando o SOH chega a 80%, neste ponto, degradações passam a ocorrer com maior velocidade. De acordo com Peralta et al. [49], os valores recomendados para o SOC de baterias de Li-Ion são entre 20% e 90%.

- Profundidade de Descarga (DoD):

A Profundidade de Descarga (*Depth of Discharge* – DoD) é, simplesmente, uma maneira alternativa de se medir o SOC da bateria. Ele é dado em valor percentual e pode ser encontrado pela fórmula: $\text{DoD} (\%) = 100 - \text{SOC} (\%)$ [46].

- Taxa de Carga (C-Rate):

C-Rate (CR) ou taxa de depleção de Coulomb, descreve a taxa na qual a bateria é carregada ou descarregada em relação à sua capacidade máxima [51]. Esta característica diz respeito, dentre outras coisas, à capacidade da bateria em gerar potência por um determinado tempo. Se a bateria está operando a uma taxa de 1C, isto significa que a sua potência de carga ou descarga (em kW) se equivale, em módulo, à sua capacidade de armazenamento (em kWh). Considerando que uma bateria de capacidade de 100kWh opera sem oscilações de potência, para um C-Rate no valor 1, ou seja, 1C, ela descarregará uma potência de 100kW durante 1 hora. Se o seu C-Rate for 2 (2C), ela descarregará 200kW, no entanto, seu tempo de operação será reduzido, passando para 30 minutos. Caso o C-Rate desta mesma bateria seja agora 0,5C, ela descarregará 50kW em um tempo total de 2 horas.

- Resistência Interna:

Define-se por resistência interna a capacidade de um corpo qualquer se opor à passagem da corrente elétrica mesmo quando existe uma diferença de potencial aplicada [40]. Segundo a lei de Ohm, podemos calcular a resistência elétrica de um circuito se soubermos a diferença de tensão entre os dois pontos e a corrente elétrica que percorre estes pontos pela relação da eq. (2).

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

Em que R é a resistência dada, pelo sistema internacional em Ω , I é a corrente (A), U é a tensão entre os dois pontos (V). Esta característica está relacionada ao aumento da temperatura na bateria e o controle dela é essencial para a otimização da sua vida útil.

- Relação do SOC e SOH com perda de eficiência nas baterias de Li-Ion:

Muitos fabricantes e operadores de baterias de Li-Ion reportam algumas restrições com relação à faixa de operação do seu SOC. Em geral, esta recomendação preconiza que tais baterias não devem ser carregadas até valores acima de 80% do SOC e nem descarregadas a valores abaixo de 20% [52], [53].

Uma das causas para este fenômeno é o comportamento da resistência interna de baterias de Lítio, nas regiões de SOC extremas, tanto próximo de 0% quanto de 100%. Fotouhi et al. [54] mostra que, nestas regiões, há uma tendência do aumento da Resistência interna de forma exponencial. A Figura 27 ilustra este comportamento para uma bateria de Lítio, onde é possível verificar o aumento da resistência da bateria nas regiões de mínimo e máximo SOC, além da variação da resistência com a temperatura.

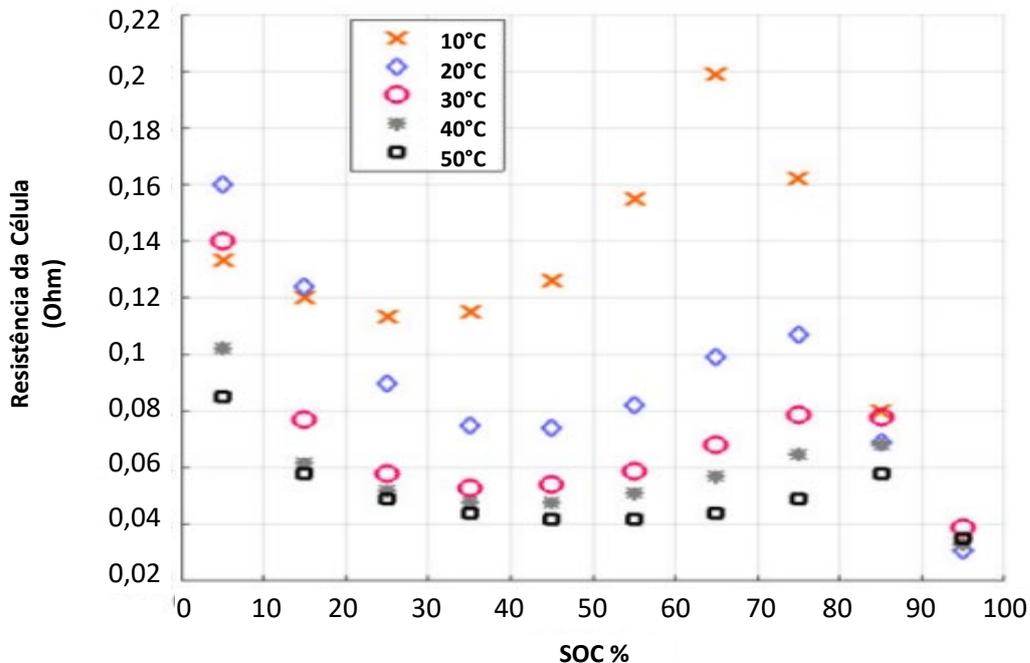


Figura 27: Relação da Resistência Interna com o SOC para uma bateria de Lítio. Fonte:[54]

Outro fator encontrado para esta limitação é baseado em formações dendríticas que ocorrem no separador da célula interna destas baterias. Estes dendritos são formações que ocorrem devido ao acúmulo de cristais de lítio que se formam inicialmente no ânodo da bateria, com formato que se assemelham a agulhas e podem se espalhar por toda a bateria. Nas faixas extremas do SOC, podem ocorrer situações em que o fluxo de íons de lítio liberados do cátodo seja maior que o recebido pelo ânodo. Devido a isso, cada vez mais íons serão depositados na superfície do material do ânodo [41]. Este fenômeno gera depósito de material no ânodo, aumentando a sua resistência interna. Tal formação de dendritos de lítio está associada ao aparecimento de pequenos curtos-circuitos no eletrólito durante o processo de carga da bateria, o que, além de diminuir a vida útil da bateria, gera o aumento de risco de explosão destes equipamentos, sendo, portanto, como visto até aqui, indesejado a utilização prolongada das baterias nestas faixas extremas de SOC [55]. Mehdi et al. [56] mostram que o crescimento da camada dendrítica nas baterias contribui para aumentar a sua perda de capacidade.[44][45]

Outro fator a ser considerado é a temperatura de operação e a sua influência na degradação mecânica da bateria. De acordo com Mjøs et al [45], as baterias operam melhor em temperaturas variando de 20°C a 30°C, o que requer boa atenção ao sistema de refrigeração destes equipamentos. Todos estes aspectos técnicos de uma bateria devem ser levados em consideração na estratégia de uso, para, além de obter uma operação mais eficiente do sistema de geração, garantir maior vida útil da bateria e o seu funcionamento de maneira segura. Segundo Miguel [40], as baterias de Li-Ion possuem densidade energética superior a outros tipos de bateria, como pode ser visto na Figura 28.

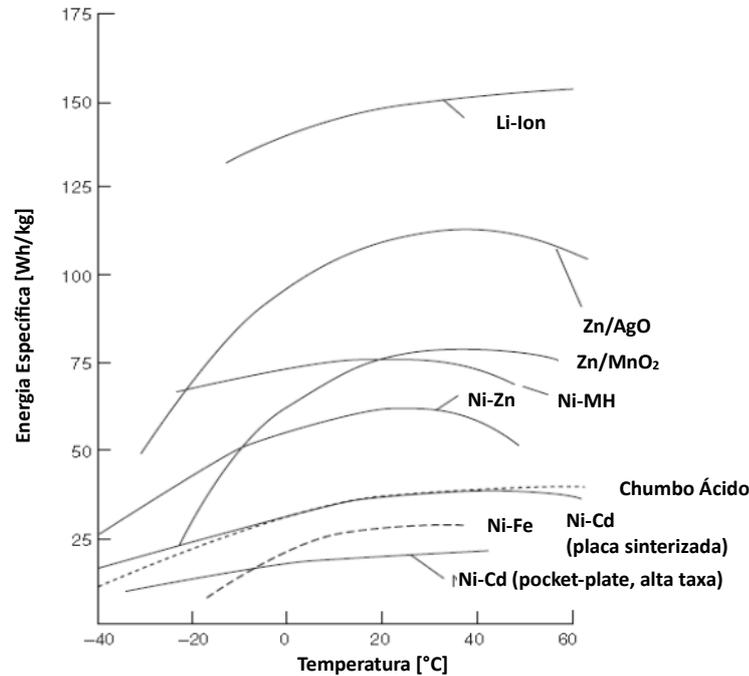


Figura 28: Relação da energia específica de baterias com a temperatura. Fonte [40]

Um grande desafio que ainda persiste na aplicação desta tecnologia refere-se ao custo de instalação das baterias. Nesse sentido, há notícias animadoras, já que o custo de produção das baterias vem diminuindo aceleradamente nos últimos anos, principalmente, pela larga utilização no setor automotivo. O gráfico da Figura 29 mostra a queda do custo de produção de baterias de íon de lítio por kWh entre os anos de 2013 e 2023 [57]. Esta redução deve-se à intensa competição entre fabricantes no desenvolvimento de novos processos e tecnologias químicas, diminuição de custo de produção nas fábricas, além da alta taxa de aprendizagem da indústria (diminuição em 19% do custo de produção cada vez que a capacidade de produção da indústria neste setor dobra). Ressalta-se que, nos últimos anos, houve uma estabilização no valor do custo por kWh para baterias de Li-Ion. De acordo com Bloomberg [57], o valor médio em 2023 é de \$153/kWh, devido principalmente a preço do Lítio e Níquel que se mantém elevado ainda refletindo o efeito da Pandemia do COVID, além dos efeitos relacionados à guerra entre Rússia e Ucrânia.



Figura 29: Evolução dos valores em \$/kWh para baterias Li-Ion. Valores reais em azul e previstos em roxo. Fonte: [57].

O uso de baterias em transportes já está bastante consolidado no setor automotivo. No entanto, a aplicação na área naval é mais recente e alguns desafios diferentes são encontrados. Uma bateria marítima deve ser centenas de vezes maior que as tradicionais

baterias elétricas veiculares [45]. Estas dimensões elevam ainda mais a preocupação com a segurança operacional destes equipamentos, principalmente com riscos de explosões ou incêndios em embarcações. Tanto para novos navios já projetados para aplicações com armazenamento quanto para navios que sofrem revitalizações, há normas de classificação específicas. Para embarcações com baterias de capacidade maior que 50kWh, a DNV GL, sociedade classificadora, possui normas e requerimentos específicos, como, por exemplo, a necessidade de, estando em operações com DP, o monitoramento tanto do SOC quanto do SOH [58],[59]. Tais requisitos são essenciais para a operação segura destes equipamentos. Atualmente a tecnologia de baterias de íon de lítio são as mais promissoras para aplicações em transportes marítimos. Segundo Mjøs et al [45], as baterias de Li-Ion representam uma tecnologia disruptiva que deve afetar diferentes setores industriais, incluindo o marítimo. Com relação à viabilidade tecnológica, já há a disponibilidade do fornecimento do conjunto dos sistemas envolvidos no armazenamento de forma compactada para aplicações navais. Em um container, todos os equipamentos são fornecidos já instalados, necessitando de poucos ajustes para *retrofit* de sistemas convencionais ou adequação a novos projetos (Figura 30).



Figura 30: Sistema compacto de armazenamento de energia numa embarcação. *Plug and Play*. Fonte: [8]

Devido à crescente demanda por aplicações de armazenamento em embarcações, normas específicas para esta finalidade já estão disponíveis. No que tange ao dimensionamento da bateria para atender ao sistema de geração de potência, vale salientar que de acordo com a norma da **DNV-GL Pt.6Ch.2 [8.6.6]**, a bateria instalada para cada sistema de potência deve ser capaz de prover potência suficiente ao atendimento à máxima carga do navio durante 30 minutos sem ser carregada[59]. Já a norma **DNV-GL Pt.4Ch.8[4.1.2-c]** especifica que o sistema de carregamento da bateria deve ser tal que 80% da carga nominal da bateria seja efetuado em até 10 horas, mesmo enquanto o sistema solicita carga normalmente[60].

2.6

Estratégias de Utilização do Sistema de Armazenamento de Energia

Até agora, foi evidenciado o potencial e impacto esperado da utilização de um sistema de armazenamento de energia em aplicações marítimas com posicionamento dinâmico, além dos aspectos que envolvem esta tecnologia, tais como: as cargas externas envolvidas, as considerações termodinâmicas dos motores à combustão interna e as peculiaridades do uso das baterias. Serão abordadas adiante as principais estratégias que podem ser utilizadas para efetivar a aplicação desta tecnologia em vista da melhoria de eficiência de consumo e eficiência ambiental, além do incremento na segurança operacional das embarcações. É importante salientar que a escolha da estratégia deve levar em conta qual o objetivo principal a ser alcançando. Além disso, estudos mostram que, para uma

mesma embarcação, várias estratégias podem ser adotadas em diferentes situações operacionais.

2.6.1

Spinning Reserve

Nessa estratégia, o objetivo é garantir a segurança operacional, além de diminuir o número necessário de MCIs em funcionamento. A bateria é mantida num estado de carga pré-estabelecido para que ela possa ser utilizada caso ocorra alguma interrupção na geração de energia pelo sistema principal. Além disso, o MCI pode funcionar em faixas de operação mais eficientes, pois não há a necessidade de obter dois motores em paralelo, dividindo a carga, já que a bateria exerce esta função de fonte reserva para efeito de segurança operacional. De acordo com Lindtjørn et al. [61], esta tecnologia propicia *back-up* para os geradores, menor necessidade de motores online por questões de segurança, melhoria na eficiência do sistema e redução das horas de funcionamento dos MCI.

2.6.2

Enhanced Dynamic Performance (Melhoria na resposta dinâmica)

Nesta estratégia, a bateria absorve cargas repentinas do sistema, mantendo o motor a combustão operando numa faixa estável e de alta eficiência. Nesse caso, a bateria é constantemente carregada e descarregada, e um dos objetivos principais dela é melhorar a resposta dinâmica a solicitações de carga, permitindo que motores com respostas mais lentas possam ser utilizados em situações com mudanças de cargas repentinas.

Na Figura 31, é apresentado por Lindtjørn et al. [61] um teste utilizando a estratégia de *Enhanced Dynamic Performance* juntamente à de *Spinning Reserve*. O eixo das abscissas representa o tempo e o das ordenadas, a potência. Na parte inicial do teste, o sistema de geração atende à demanda de carga, representada pela linha azul, através da utilização da bateria em verde, que absorve as cargas dinâmicas, juntamente com o MCI, fornecedor principal, que gera potência constante e é representado pela linha vermelha. Percebe-se que a bateria é constantemente carregada e descarregada, por isso, a sua potência varia entre valores positivos e negativos no gráfico. Pelo teste, observa-se que a bateria tem uma capacidade de resposta muito rápida às variações de carga. Isto é visto pela sincronia entre as linhas azul e verde na variação com o tempo. A resposta dos seus componentes eletrônicos é muito mais veloz que a gerada pelos MCI devido a inércias inerentes a um sistema mecânico. Na segunda parte do gráfico, em torno de 340s, o motor é desconectado da rede, representando uma falha na geração principal e a bateria passa a assumir toda a carga demandada, operando agora na estratégia de *Spinning Reserve*. Pode-se observar esta situação na faixa intermediária do gráfico, onde a linha vermelha passa a estabilizar em zero e as linhas verdes e azul são coincidentes. Na parte final do gráfico, o motor é religado e o comportamento volta a ser o inicial.

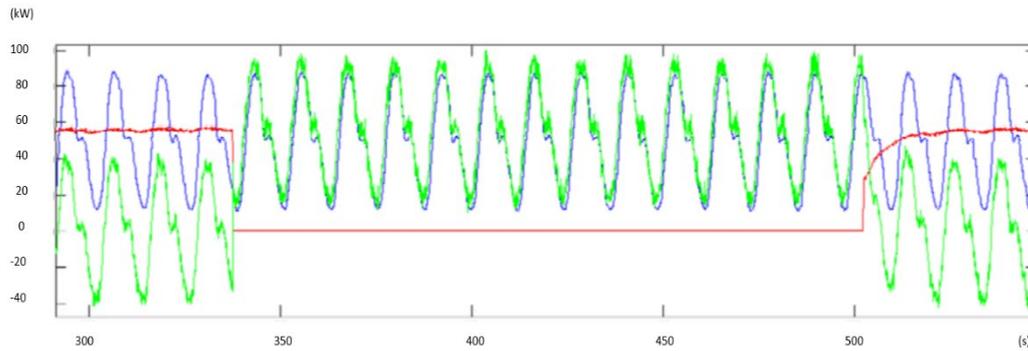


Figura 31: Uso simultâneo da estratégia de melhoria de resposta dinâmica e *Spinning Reserve*. MCI em vermelho, bateria em verde e demanda externa em azul. Fonte: [61]

2.6.3

Peak Shaving

Quando há um perfil de demanda de potência com picos durante o ciclo de operação, o sistema de geração deve ser projetado de tal forma que atenda completamente a esta demanda de pico. No entanto, nestes tipos de operação, a infraestrutura será subutilizada na maior parte do tempo, alcançando a sua capacidade nominal de operação em apenas poucos momentos [62]. A estratégia de *Peak Shaving* surge para dirimir este problema de subutilização do sistema. Ela se assemelha bastante a de aumento da resposta dinâmica. No entanto, a diferença está no objetivo a ser alcançado. Enquanto a anterior visa a melhoria da resposta dinâmica do sistema, permitindo que motores com respostas mais lentas possam ser utilizados, como exemplo de turbinas a gás, o foco do *Peak Shaving* é evitar que haja o excesso de equipamentos no sistema de geração, principalmente, quando a necessidade dos equipamentos extras forem para suprir apenas picos de demanda em poucas etapas da operação. Além disso, no *Peak Shaving*, o MCI pode variar o seu ponto de operação, mas isso ocorrerá de maneira mais suave e de forma a não se distanciar muito das faixas mais eficientes do seu mapa de operação. Isto ocorre porque o MCI não “enxerga” os picos de carga, que são absorvidos pelo sistema armazenamento.

Na Figura 32, é mostrado um exemplo da aplicação desta estratégia [63]. Observa-se nela a diferença entre uma operação com e sem o *Peak Shaving*. A linha tracejada azul mostra a variação de potência do MCI quando ele tem que suprir toda a demanda de carga externa. Já a linha vermelha representa a mesma variação do gerador principal quando a estratégia de *Peak Shaving* é adotada. Percebe-se claramente que a linha tracejada tem variações muito maiores que a linha vermelha, pois no segundo caso, os picos de demanda são absorvidos pelo sistema de armazenamento de energia. Além disso, percebe-se também que não há necessidade de operar os moto geradores com cargas muito baixas já que eles devem manter rotações maiores para fornecer a potência necessária para carregar as baterias, como mostrada na região em vermelho claro no gráfico. Isso evita que os MCIs deste sistema funcionem nas zonas de menor eficiência.

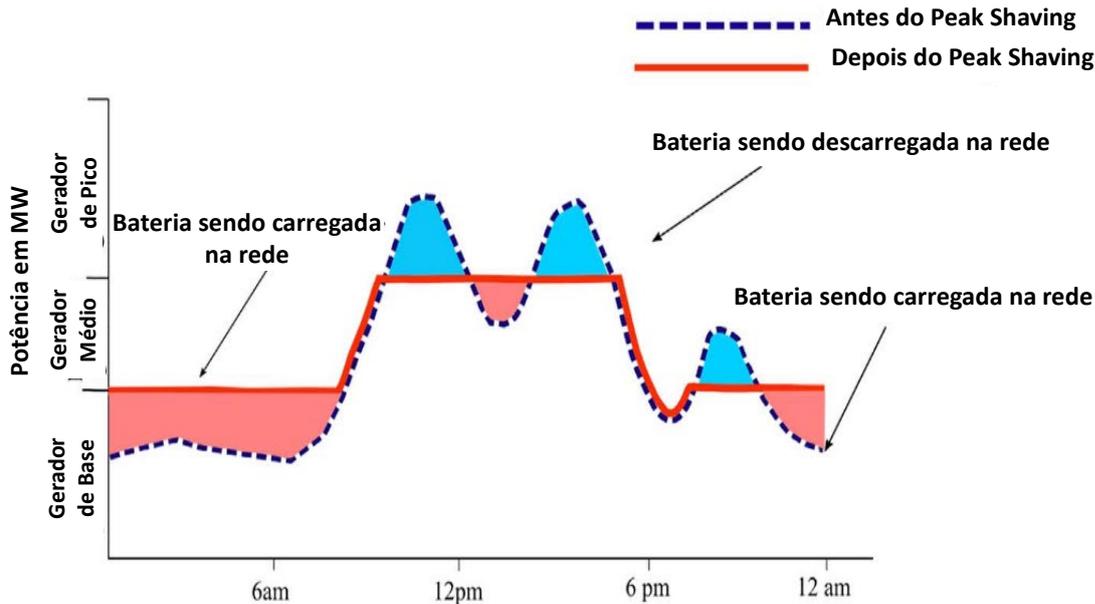


Figura 32: Aplicação de estratégia *Peak Shaving*. Fonte: [63]

2.6.4

Estratégia de Zero Emissão

Como o próprio nome diz, nessa estratégia, a bateria assume toda a demanda de carga externa em situações específicas. Neste momento, os motores a combustão interna são desligados de forma a não emitirem nenhum gás poluente. Essa estratégia visa basicamente atender a requisitos ambientais em locais específicos, como em operações de porto, mais próximas às zonas urbanas, além de zonas ambientais mais sensíveis aos poluentes. Lhomme & Trovão [37] aplicaram esta estratégia em uma embarcação de turismo que devia passar, em parte do seu trajeto de viagem, por uma região de proteção ambiental. O gráfico da Figura 33 mostra as duas situações de operação da embarcação. Na esquerda, o sistema opera somente com os motores a combustão interna sendo a P_{ICE} a potência gerada pelos MCI e P_{Bat} a potência fornecida pela bateria, que nesta situação é zero. Observa-se que a carga dos motores é constante por se tratar de um barco de passeio que não demanda muitas variações de potência. Já nos gráficos da direita, pode-se observar que no início e fim do trajeto, ambas operações nas regiões de porto, apenas a bateria absorve a demanda de potência, pois neste caso a embarcação está próximo ao porto, uma zona de restrição ambiental. Já no meio do trajeto, o motor opera com carga maior, quando comparado com o gráfico da esquerda, pois ele necessita, além de suprir a carga necessária à movimentação do barco, recarregar a bateria. A Figura 34 mostra o mapa de eficiência no motor utilizado neste estudo. É interessante observar que, neste caso, a estratégia de zero emissões fez o motor operar em um ponto menos eficiente, como podemos observar no mapa a diferença nas linhas de eficiência de consumo onde se encontram o ponto em verde (com a bateria) e em vermelho (sem a bateria). Como o objetivo foi eliminar as emissões próximas às zonas de atracamento, foi aceita esta perda de eficiência, acarretando 8% a mais de consumo por cada viagem.

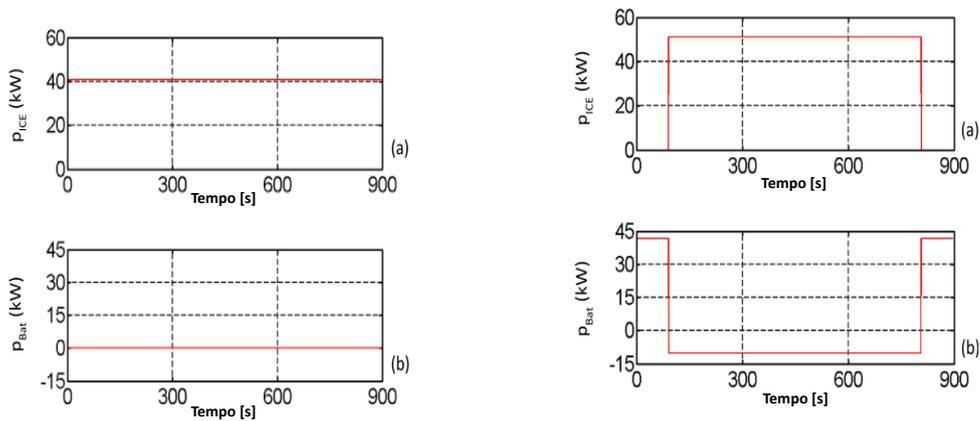


Figura 33: Aplicação da estratégia de zero emissão num navio de turismo. Nos gráficos da esquerda, observa-se a operação apenas com o motor em funcionamento. Nela, durante todo o trajeto, a potência do motor P_{ice} é constante e a potência da bateria P_{bat} é nula. Na direita, a bateria é carregada no meio do trajeto, região do gráfico em que P_{bat} é negativo, e é utilizada como fonte de energia no início e fim do trajeto, propiciando uma navegação sem a emissão de poluentes, uma vez que o P_{ice} permanece nulo nestes pontos. Fonte: [37]

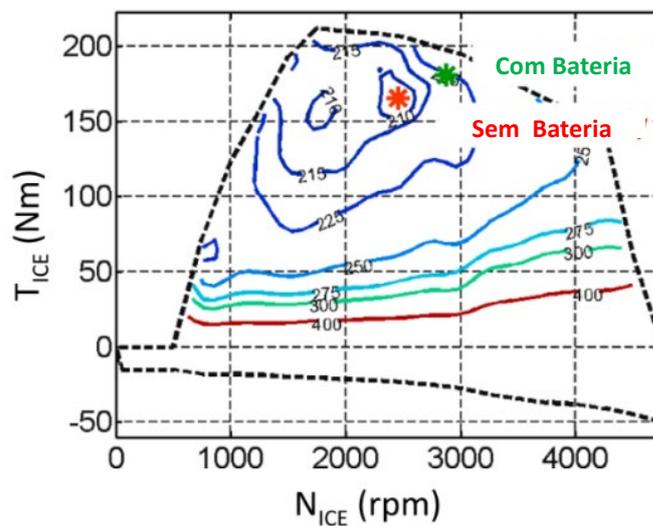


Figura 34: Mapa de operação de um motor com as curvas de consumo específico variando com Torque e Rotação dos motores. No ponto em verde, a operação com o uso da bateria evidencia maior consumo específico do motor do que na operação sem a bateria no ponto em vermelho. Neste caso, o objetivo maior era utilizar a estratégia de emissão zero em região com restrições de emissões. Fonte: [37]

2.7

Variáveis estatísticas de interesse para uma média temporal

Entende-se por série temporal, um conjunto de observações feitas sobre uma variável qualquer ao longo de um período. Neste trabalho, serão analisados dados referentes ao comportamento de uma embarcação ao longo de intervalos específicos de tempo. Para a obtenção de informações de interesse, algumas variáveis estatísticas serão analisadas. A seguir citamos as principais:

2.7.1

Média Simples

A média simples, ou média aritmética (μ) representa uma medida geral de tendência central de uma amostra. O seu cálculo se dá realizando a soma de todos os valores dos dados e dividindo essa soma pelo número de observações. Sua fórmula é dada a seguir pela eq. (3).

$$\text{Média} = \frac{\sum(x_i)}{N} \quad (3)$$

Em que:

$\sum(x_i)$ é o somatório de todos os valores da amostra.

N é o número de observações da amostra.

2.7.2

Desvio Padrão

O desvio padrão (σ) é uma medida de dispersão de uma amostra e representa a quantificação do afastamento dos dados em relação à média. Quanto maior o desvio padrão, maior, portanto, é a dispersão desta amostra, em relação à média.

A fórmula para o cálculo do desvio padrão populacional (σ) é dada na eq. (4):

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum(x_i - \mu)^2}}{N} \quad (4)$$

onde:

x_i são os valores individuais dos dados.

μ é a média dos dados.

N é o número de observações.

O desvio padrão amostral (s) é calculado de maneira semelhante, mas usa-se (N-1) no denominador para estimar a variabilidade da população a partir de uma amostra.

2.7.3

Coeficiente de Variação

O coeficiente de variação (CV) é uma medida de relativa variabilidade ou dispersão dos dados, semelhante ao desvio padrão, no entanto, expressa como uma porcentagem. Ele é utilizado para comparar a dispersão entre conjunto de dados com diferentes magnitudes. Esta variável é de grande interesse, pois fornece uma medida normalizada da dispersão[64]. Sua fórmula é dada pela eq. (5):

$$CV\% = 100 * \frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \quad (5)$$

2.7.4

Média móvel

Uma forma alternativa de obter a tendência central de uma série temporal dá-se através das médias móveis. Para esta média, ao invés de obter uma média única de todos

os dados da amostra, escolhe-se um intervalo de período N da série e utiliza-se este valor com o valor de tendência central. Ao avançar um período, recalcula-se novamente a média dos N períodos, desta vez, desprezando o primeiro período da média imediatamente anterior. Para a variável N, dá-se o nome de ordem da série. Por exemplo, para uma média móvel de ordem 10 dos 100 primeiros números inteiros de um intervalo entre 1 e 100 deve-se calcular inicialmente a média entre os números compreendidos no intervalo de 1 a 10:

- Para os números de 1 a 10, a média móvel é $(1+2+3+4+5+6+7+8+9+10)/10 = 5.5$;
- Em seguida, calcula-se a média entre o intervalo dos números 2 a 11;
- Para os números de 2 a 11, a média móvel é $(2+3+4+5+6+7+8+9+10+11)/10 = 6.5$;
- Em seguida, entre 3 e 12, assim sucessivamente até se alcançar o último dia do mês.

É importante observar que este tipo de média tende a suavizar a curva. No exemplo da Figura 35, tem-se o gráfico dos valores de vendas de um determinado produto entre os anos 1970 e 1992[65]. Este valor está representado na cor azul. Observa-se nas cores vermelha, verde e rosa, os resultados para as médias móveis de ordem 3, 5 e 7 respectivamente. Nota-se que, quanto maior a ordem, menor a amplitude da variação da curva gerada pelas médias. Esta é uma característica bastante útil na aplicação das médias móveis, pois, ao invés de se ter uma linha única representando o valor da média aritmética, a curva gerada pela média móvel flutua em torno dos valores reais aumentando a sua dispersão de acordo com a diminuição do valor de ordem N.

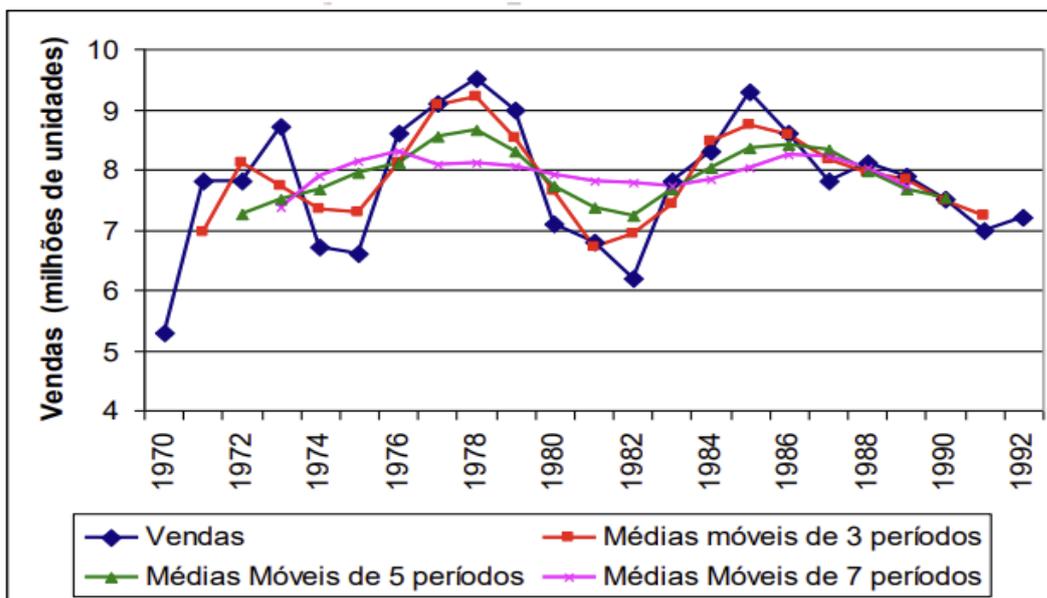


Figura 35: Exemplo de utilização de médias móveis. Fonte: [65].

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Após uma avaliação dos aspectos tecnológicos que podem interessar na aplicação da hibridização com armazenamento de energia nas aplicações navais, faremos um relato de alguns resultados anteriores encontrados por cientistas em assuntos relacionados ao tema.

Em Endresen et al. [66], realizou-se estudo quantitativo das emissões de poluentes e gases do efeito estufa, além de deposição de ácidos provenientes de atividades de navegação na região do Ártico entre os anos 2000 e 2015. O estudo verificou o forte impacto da navegação na emissão de poluentes como o exemplo da Noruega em 2003, onde as operações marítimas foram responsáveis por 40% das emissões nacionais de NO_x , 17% do SO_2 , 9% do CO_2 e cerca de 1% do CO emitidos antropogenicamente naquele país.

Foi comparado por Hansen et al. [67] a utilização de motores AC e DC em aplicações marítimas de suporte a operações *offshore*. Foi mostrado que há grande vantagens na utilização de geração de energia DC como: flexibilidade na velocidade de operação em relação aos motores AC, menor peso (redução de cerca de 30%), espaço necessário para o sistema, maior flexibilidade para a operação com diferentes fontes de geração e armazenamento de sistema.

Em Dedes et al. [32], analisou-se o impacto nas emissões de CO_2 , NO_x e SO_x , além do consumo específico de uma frota de navios graneleiros, através da aplicação de armazenamento de energia para otimizar a operação. O estudo foi realizado primeiramente através da análise de dados estatísticos de frotas de navios graneleiros, sendo avaliado o consumo em viagens com carga e descarregados. Após isso, foi realizada uma simulação numérica com os mesmos dados obtidos aplicados a dois sistemas diferentes utilizando armazenamento de energia. A simulação mostrou a viabilidade do uso do sistema de armazenamento apenas quando os navios da frota estão nas viagens com cargas, pois, de acordo com os autores, os motores convencionais operam mais distantes de seus pontos ótimos. Já na navegação descarregado, não foram evidenciadas reduções consideráveis no consumo e emissões.

Foi realizado por Zahedi et al. [17] simulação numérica com um navio de posicionamento dinâmico OSV - *Offshore Support Vessel* para comparar o consumo específico de combustível da embarcação operando com um sistema de geração AC, um sistema DC e um sistema DC com armazenamento de energia. Ao final da simulação, os autores concluíram que o sistema DC é 15% mais econômico em relação ao AC. Já a geração DC acoplada a um sistema de armazenamento tem a eficiência 7% melhor que o DC sem armazenamento.

Em Chauhan et al. [68], implementou-se um modelo otimizado para geração de energia em navio do tipo *Platform Support Vessel* PSV voltado para minimização de consumo de combustível. Foram testadas 3 configurações sendo elas:

- motores AC dividindo igualmente a demanda carga ;
- motores DC dividindo igualmente a carga;
- motores DC dividindo a carga de forma otimizada usando o algoritmo de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Como resultado, o modelo utilizando o algoritmo PSO obteve uma redução de consumo de 307 ton/ano em relação à configuração AC e 155 ton/ano em relação à configuração DC.

Em Zhao et al. [69], foi simulado numericamente o sistema de potência de um navio de carga baseado em propulsão mecânica tendo como fonte de potência um MCI. Neste sistema, foram modelados numericamente o motor marítimo, o impelidor e o efeito das cargas externas das ondas.

Através de uma estratégia de modulação do propulsor baseado em degraus, pôde-se diminuir o efeito da perda de empuxo no impelidor devido ao efeito de ventilação do mesmo (quando o impelidor gira fora da água devido à ondulação oceânica). A utilização da estratégia de controle baseada na modulação do motor por degraus gerou diminuição do consumo energético e das emissões de gases como CO₂, NO_x e SO_x.

Em Yum et al. [15], avaliou-se o efeito de cargas transientes no comportamento de um motor turbo-diesel. Para isso foram aplicadas variações de carga na forma senoidal com amplitude fixa. Foram verificadas variações tanto no consumo quanto na produção de NO_x pelo motor, ambas em relação aos valores estabelecidos para cargas em estado estacionário. Foi ainda observado que a influência é maior quando o motor opera a baixa ou média carga, sendo as diferenças máximas encontradas de 6,7% para o consumo específico de combustível e 9,1% para a emissão de Nox.

O trabalho confeccionado por Kalikatzarakis et al. [11] realiza simulação numérica, aplicando o conceito de estratégia de minimização de consumo equivalente -ECMS (sigla em inglês para *equivalent consumption minimization strategy*) em um navio com sistema de potência híbrido com armazenamento de energia, podendo ser carregado por fonte externa (no porto). A estratégia tem como objetivo realizar a escolha em tempo real das diferentes fontes de energia, de acordo com a demanda de carga, além de minimizar a depleção da bateria (tempo entre cargas) em cada ciclo de operação do navio rebocador, utilizado na análise. O autor utiliza em sua simulação, modelos matemáticos para o conjunto motor diesel-governador, englobando as perdas mecânicas e térmicas na câmara de combustão, inversores de frequência, bateria, demandas de cargas auxiliares, propulsão e resistência do casco. Ao final da simulação, foi constatado que a estratégia ECMS possibilitou a redução de consumo em até 6% e das emissões de CO₂ entre 5 e 10%.

Em García-Olivares et al. [70], realizou-se estudo sobre os principais desafios em estabelecer uma economia baseada em geração de energia 100% renováveis. Os autores observaram que em um médio prazo, a transição energética deve passar pelo uso mais inteligente de energia baseada em fontes fósseis. A conversão do sistema de transporte é um dos principais desafios. Abordando mais especificamente o transporte marítimo, os autores concluem que a transição para transporte marítimo 100% renovável não deve ser uma prioridade na mudança em relação a outros modos de transporte devido aos custos associados com a geração do combustível renovável marítimo (gás natural). Isso geraria um aumento no consumo global em cerca de 163% devido a necessidade de geração do gás através da energia elétrica.

Foi realizado por Al Falahi et al. [71] uma simulação numérica de um navio tipo ferry aplicando um sistema de hibridização em um motor elétrico tipo DC. Como estratégia de controle foram consideradas uma estratégia clássica *Rule-Based Control* (RB) e uma segunda estratégia denominada *Grey Wolf optimization* (GWO) que é baseada no gerenciamento de potência meta-heurístico (onde se pode resolver problemas de otimização com mais de uma função objetivo). Os dois métodos proporcionam a operação com 0% de emissão quando o navio está atracado (uso apenas da bateria). Além disso, o primeiro método obteve uma redução de consumo de 2,91% enquanto o segundo proporcionou redução geral de consumo por operação de 7,48%. Já para as emissões, ambos os métodos forneceram um acréscimo de CO₂, NO_x e SO_x nas operações de cruzeiro,

devido à necessidade de gerar potência extra para abastecer a bateria. No entanto, para a estratégia GWO, houve redução no índice global das emissões de CO₂ e SO_x (1,88% e 1,93% respectivamente) enquanto houve um pequeno acréscimo global para o NO_x (1,22%). Já para a estratégia RB, houve acréscimo nas emissões calculadas dos três poluentes citados.

Foi realizada por Lhomme & Trovão [37] a simulação de conversão de uma embarcação de turismo, que opera em áreas sensíveis às questões ambientais como lagos e áreas de proteção ambiental, de um sistema de geração de energia convencional (motor de combustão interna) para um sistema híbrido com armazenamento de energia. A estratégia de hibridização incluía operação com MCI gerando potência a carga constante e supercapacitor absorvendo as cargas transientes, em parte do trajeto do navio. Nas situações próximas ao porto de atracação, região mais sensível às questões ambientais, foi simulado o uso apenas de bateria (operação com zero emissão). Como resultados principais os autores citaram redução do CO₂ em 1,39kg nas operações de porto, mas aumento do consumo e emissões em 8% na operação de cruzeiro, pela necessidade de operar o MCI fora das condições ótimas para carregar a bateria, o que, segundo o autor, poderia ser substituído pelo carregamento por fonte externa da bateria enquanto a embarcação está no porto.

Bordin & Mo. [72] propõem uma metodologia matemática para otimizar a seleção do sistema de armazenamento de energia, de acordo com o tipo de embarcação, considerando tempo de vida da bateria, restrições técnicas e de segurança impostas no modelo além do tipo de operação, mostrando que o tipo de operação a ser realizada pelo navio tem forte influência na decisão da viabilidade ou não do uso do sistema de armazenamento.

Em Fu & Gao [73], foi proposta uma aplicação conjunta de supercapacitor com bateria para suprir a necessidade de uma embarcação de guerra com intensa demanda de cargas pulsantes. Para minimizar a quantidade de cargas e descargas da bateria e assim aumentar o seu tempo de vida, as cargas pulsantes eram absorvidas prioritariamente pelo supercapacitor, aproveitando suas características favoráveis como maior número de ciclos na sua vida útil, maior densidade de potência e melhor tempo de resposta que a bateria. Os resultados mostram que a proposta adotada tem potencial para prolongar a vida útil da bateria em situações com cargas pulsantes de alta intensidade e frequência.

Em Mastermaker et al. [74] foi estudada uma configuração de hibridização com armazenamento de energia em um conjunto de geração de potência com motores *dual fuel*, operando com gás natural e óleo diesel, para um navio de dragagem que, pelo seu perfil de operação, possui muitas flutuações de carga. Os autores buscaram otimizar a utilização dos combustíveis no motor, já que, quando operando com gás natural, tem menor capacidade de absorção das cargas transientes, porém há menor emissão de gases poluentes. Já no modo a diesel, há maior índice de emissões, no entanto o sistema suporta cargas mais severas. Foi adicionado ao modelo um sistema de armazenamento de energia cinético (KESS da sigla em inglês para *Kinetic Energy Storage Systems*) com capacidade curta de fornecimento de energia, cerca de 20s entre cada ciclo de carga, a fim de minimizar o tempo de operação do motor no modo diesel. Observou-se no modelo que, apesar de menor tempo de operação no modo diesel, houve um custo adicional pelo incremento do KESS no consumo específico em 21%, sendo sugerido a substituição do KESS por um sistema com maior capacidade de armazenamento de energia.

Em Letafat et al. [75] foi desenvolvido um modelo para estudar a aplicação de células combustíveis como fonte primária de energia, além de bateria e carregamento elétrico no porto (*Cold Ironing*) em um navio de transporte do tipo *ferry boat*. Foi desenvolvido um modelo matemático para otimizar o uso da célula combustível, considerando a não linearidade da eficiência dela. Além disso, o objetivo do modelo também é otimizar os custos de operação e dimensionamento da célula combustível, tanque

de hidrogênio e da bateria. Para otimização foi utilizado o algoritmo seno cosseno aprimorado (ISCA em inglês). Como resultados obteve-se redução de 2% nos custos diários agregados de operação e investimento.

Peixoto [76] simulou a operação para a geração de energia diesel-elétrico aplicado em um navio de suporte a plataformas. No seu trabalho, foram desenvolvidos modelos incluindo o gerador, a bateria de íon de lítio e os motores elétricos integrado ao trem de força. Após validação dos modelos foram realizadas as simulações visando otimização da operação. Utilizando a abordagem de carregamento estratégico além da estratégia, foi possível observar na simulação redução no consumo e diminuição das horas de trabalho dos motores, quando comparado com perfil, tanto na operação sem a hibridização, com a alteração do perfil operação dos motores, quanto na simulação com a hibridização. Houve redução máxima de 14% otimizando o sistema e aplicando a hibridização, no entanto, ao se aproximar os motores da faixa de operação de máxima eficiência, foi observado um acréscimo nas emissões de NO_x , o que deve ser levado em conta.

Kolodziejski & Pozoga [77] realizaram uma revisão nos estudos recentes sobre hibridização de navios, abordando diferentes tipos de sistemas de armazenamento de energia e de gerenciamento para embarcações. Em sua análise, foi observado que dificilmente haverá uma liga metálica que substitua o Lítio por este material ser um dos mais leves da tabela periódica. Também no seu artigo foi revelado que a tecnologia de hibridização em navios pode chegar à economia de cerca de 25% no consumo e que e redução de até 50% de emissões. Há também ganhos com diminuição de custos de manutenção nos motogeradores devido à redução de tempo de máquina com o uso da hibridização. Os autores ainda revelam que, em média, o tempo de compensação no investimento na hibridização de um navio é de cerca de 5 a 8 anos.

Akbarzadeh et al. [78] procederam com uma análise para um rebocador, objetivando otimizar o dimensionamento do seu sistema de geração e armazenamento de energia. A fim de otimizar o sistema, foi analisada uma topologia *full-active* paralela onde duas baterias podem trabalhar paralelamente e são desacopladas eletronicamente, sendo que uma bateria tem alta capacidade de armazenamento de energia e outra tem como característica principal, alta disponibilidade de potência. Foi também desenvolvida uma metodologia para dimensionamento da bateria, baseado no perfil anual de operação do rebocador. Ao final do estudo, concluiu-se que a utilização da topologia com as duas baterias oferece uma redução de custo que pode chegar a 28% em relação ao uso da topologia de monotipo. Além disso, pode-se obter também uma redução de 30% em peso entre as duas topologias analisadas.

Foi realizado um estudo por Baia et al. [79] com um navio do tipo Ferry com capacidade de transporte 1500 passageiros e 290 veículos de passeio com geração de energia a base de MCI que percorre por viagem 3.6 milhas náuticas num trajeto que dura 20 minutos e que é realizado 26 vezes por dia. A geração de energia é realizada por 3 motores com capacidade de 3MW cada e por viagem são gastos em média 965kWh. Foram avaliadas diferentes propostas de configuração de eletrificação do navio, desde a sua eletrificação total com o uso de baterias sobressalentes que seriam carregadas no porto enquanto no navio navegava, sendo trocadas a cada parada para carga e descarga do navio, como também a solução híbrida com a substituição de um dos motores pelo sistema com banco de baterias. Nesta última solução, além de se poder realizar operação com zero emissão nos portos, os motores poderiam funcionar próximo a sua faixa ótima de operação para carregar a bateria, desta forma diminuição o consumo e, conseqüentemente, as emissões. Outra vantagem é a necessidade de um dimensionamento menor para as baterias neste caso. Os autores ainda chegam à conclusão que seria possível reduzir em 35% as emissões com o uso da tecnologia híbrida.

Após análise apurada das publicações recentes relacionadas ao tema da hibridização em embarcações, não foi evidenciado o estudo de estratégias com a utilização

de médias móveis para a gestão dos Motores de Combustão Interna do Sistema de Geração. Desta forma, este trabalho traz como originalidade a construção de um simulador que, dentre outros objetivos, visa a análise da utilização de diferentes estratégias abordando médias móveis das cargas de demanda do sistema para otimizar a utilização do SGE, juntamente com um banco de baterias de forma a se chegar ao consumo de combustível otimizado para a geração de energia necessária para alimentar uma embarcação nos seus diversos tipos de operações.

4

METODOLOGIA

4.1

Divisão da metodologia

Neste tópico, apresentam-se os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

O trabalho foi dividido da seguinte forma:

1) Aquisição e processamento dos dados da embarcação:

Etapa em que são obtidos todos os dados relativos ao posicionamento do navio, tipo de operação que ele estava realizando, além dos parâmetros relativos à potência e consumo do SGE da embarcação.

2) Diagnóstico de operações da embarcação:

Nesta etapa, os dados coletados no navio são tratados através da ferramenta *Power Query* e, posteriormente, enviados ao programa Power Bi para novos tratamentos e criação de painéis.

3) Criação do simulador:

Com os dados já tratados, é construído um simulador no programa Excel com a finalidade de verificar o funcionamento do navio com a tecnologia de hibridização, com as demandas de carga reais de operação. Pretende-se comparar o comportamento do navio funcionando na configuração do Sistema de Geração de Energia (SGE) atual e o comportamento do navio aplicando a estratégia de hibridização com o uso do banco de baterias proposto.

4.2

Descrição da embarcação

Para este trabalho, foi escolhida uma embarcação de Suporte a Plataformas de 4700 toneladas, conhecido por sua sigla em inglês, PSV (*Platform Supply Vessel*). A embarcação se assemelha ao exemplar da Figura 36 .



Figura 36: Exemplo de Embarcação do Tipo *Platform Support Vessel* ou Navio de Suporte a Plataformas Fonte: [80]

Esta embarcação tem como característica a possibilidade de execução de diferentes atividades de apoio a plataformas de petróleo, incluindo, como atribuição principal, o transporte de equipamentos, insumos e pessoas, mas também, executando outras atividades subsidiárias, tais como: combate a incêndios, lançamento de produtos nos poços de petróleo com o auxílio de bombas, dentre outros. De acordo com a AMBEAM [80], estas são embarcações especializadas no apoio às unidades de perfuração, produção e outras unidades marítimas, tendo, como importante característica, a grande variedade de carga que pode abrigar, o que o torna bastante versátil. Ainda a AMBEAM [80], estas embarcações necessitam de alta capacidade de manobra próximas a plataformas e a outros equipamentos da indústria de petróleo, por questões de segurança operacional. Devido às possíveis condições climáticas adversas nas operações de carga e descarga, os PSVs normalmente são dotados de sistemas de posicionamento dinâmico. Esta alta gama de operações executadas por este tipo de embarcação requer um SGE bastante versátil, capaz de atender a diferentes demandas.

Inicialmente, neste trabalho, objetivou-se identificar o perfil operacional desta embarcação, uma vez que, como já posto, há diferentes possibilidades de atividades realizadas por ela, com perfis diversos de comportamento do seu SGE. No diagrama da Figura 37, pode-se observar a representação simplificada do SGE da embarcação. Nela percebe-se a divisão do sistema de geração em dois lados simétricos, sendo o lado esquerdo composto pelos geradores G1 e G2, além dos propulsores, e o lado direito pelos geradores G3 e G4 e seu respectivo sistema de propulsão. No centro do barramento, há uma chave (*bus tie*) responsável por manter os dois lados conectados ou independentes, atendendo as exigências de segurança operacional do navio.

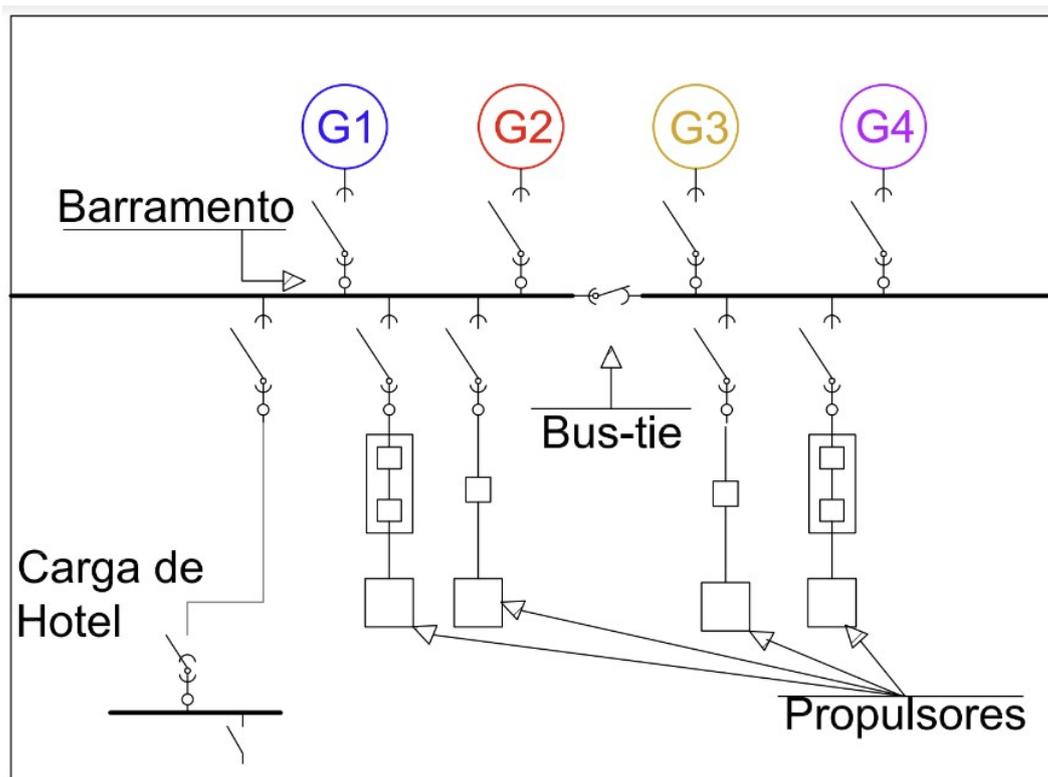


Figura 37: Diagrama do SGE do navio objeto do estudo, evidenciando os 4 motores geradores, barramento do sistema, além dos propulsores.

4.3

Aquisição dos parâmetros

Baseado na configuração do SGE, foi definida uma lista de parâmetros necessários à avaliação da condição de funcionamento da embarcação, principalmente no que tange ao consumo de combustível, modos de operação e as potências elétricas envolvidas. Para este monitoramento, foram identificadas os seguintes indicadores de interesse a serem aquiritados:

- Tipo de operação realizada pela embarcação: navegação, atracado, em DP, ROV (*Remotely Operated Vehicle*), etc.;
- Barramento elétrico aberto ou fechado;
- Posição geográfica;
- Potência gerada individualmente por cada grupo gerador em kW;
- Consumo de combustível instantâneo individual dos geradores em Litros por hora (L/h).

Para a obtenção destas informações, contou-se com o apoio da empresa proprietária do navio. A empresa implementou um sistema de armazenamento e transmissão das informações relativas a cada um dos geradores do SGE, diretamente do sistema de monitoramento e controle da embarcação. Paralelamente, foram fornecidas as informações relativas ao tipo de operação que a embarcação realizava e quais geradores estavam em funcionamento durante cada operação.

Os dados aquiritados foram enviados de três formas diferentes, sendo elas:

- Planilha de Excel com dados diários referentes ao tipo de operação do navio. Nesta planilha, as informações foram coletadas com um intervalo de 1 minuto a cada medição, contendo os seguintes dados:
 - Data e horário de cada aquisição;
 - Posicionamento do navio;
 - Tipo de operação realizada;
 - Classificação da operação em DP ou não DP;
 - Número de geradores acionados;
 - Estado do barramento (aberto ou fechado).
- Arquivo de texto (.txt) com dados do consumo do navio por cada gerador:

Estes arquivos contêm os dados de consumo de combustível para cada gerador, medidos segundo a segundo. Observa-se que, em algumas ocasiões, houve uma lacuna de cerca de 10 segundos de uma medição para outra.
- Arquivo de texto (.txt) dos dados de potência para cada gerador:

Estes arquivos de dados contêm as potências geradas em cada um dos geradores, a cada segundo coletado. Eles fornecem valores positivos quando os geradores estão em funcionamento e, quando não estão em uso, o valor deve aparecer nulo, dentro do arquivo.

4.3.1

Dificuldades enfrentadas no processamento dos parâmetros

É importante ressaltar que, em vários momentos, houve a descontinuidade da recepção das informações, ora dos arquivos de consumo, ora dos arquivos de potência. Esta dificuldade, aliada ao elevado número de arquivos (para cada segundo coletado foi gerado um arquivo diferente) foi um desafio para o processo de tratamento dos dados. Outro problema relativo aos dados foi a falta de sincronia entre eles, em alguns casos. Em dadas situações, as informações provenientes das 3 fontes de dados citados, para um mesmo instante da medição, apresentavam informações conflitantes, mostrando configurações diferentes para um mesmo gerador, como por exemplo, apresentar o mesmo gerador **desligado** em uma fonte de dados e **em funcionamento** em outra, para um mesmo instante, o que gerou a necessidade de analisar e corrigir estes problemas no processo de tratamento dos dados.

Estas dificuldades, somadas à elevada quantidade de registros gerados (cerca de 5 milhões), levaram a uma demanda de trabalho acima do esperado no intuito de consolidar os dados provenientes de diferentes fontes em uma única planilha. Os dados, após consolidados em uma planilha do Excel, foram tratados no programa *Power Query*, que possui ferramenta específica para executar o processamento ETL (*Extract, Transform, Load*) com os dados [81]. Desta forma, o processamento pode ser realizado de forma mais ágil, mitigando os problemas citados anteriormente. Após o tratamento, utilizou-se o programa *Power Bi* para gerar os gráficos e os filtros necessários para melhor visualização e compreensão das informações.

4.3.2

Diagnóstico de operações do navio

A primeira etapa de diagnóstico teve como objetivo a identificação e quantificação dos diferentes tipos de operações realizadas pelo navio. Foram analisados os dados diários de operação do navio recebidos entre 15/07/2020 e 30/12/2020.

Foram construídos dois painéis para consolidar estas informações. A Figura 38 mostra o primeiro painel contendo um exemplo com os dados levantados de operação. Pode-se observar no gráfico A, no topo esquerdo da figura, os valores percentuais de tempo gasto em cada tipo de operação de acordo com a nomenclatura fornecida pela tripulação do navio. No segundo gráfico de pizza, no canto superior direito (gráfico B), vê-se a relação entre as operações em que ocorreram o posicionamento dinâmico (DP), as que ocorreram com o navio em navegação (NÃO DP) e aquelas em que o navio estava parado. Já os gráficos menores, na parte inferior direita do painel, referem-se aos percentuais de tempo de operação com barramento aberto/fechado (gráfico C) e aos números de geradores em funcionamento para cada operação (gráfico D). Além dos gráficos, no canto esquerdo inferior do painel, pode-se verificar os filtros utilizados para a apresentação dos resultados.

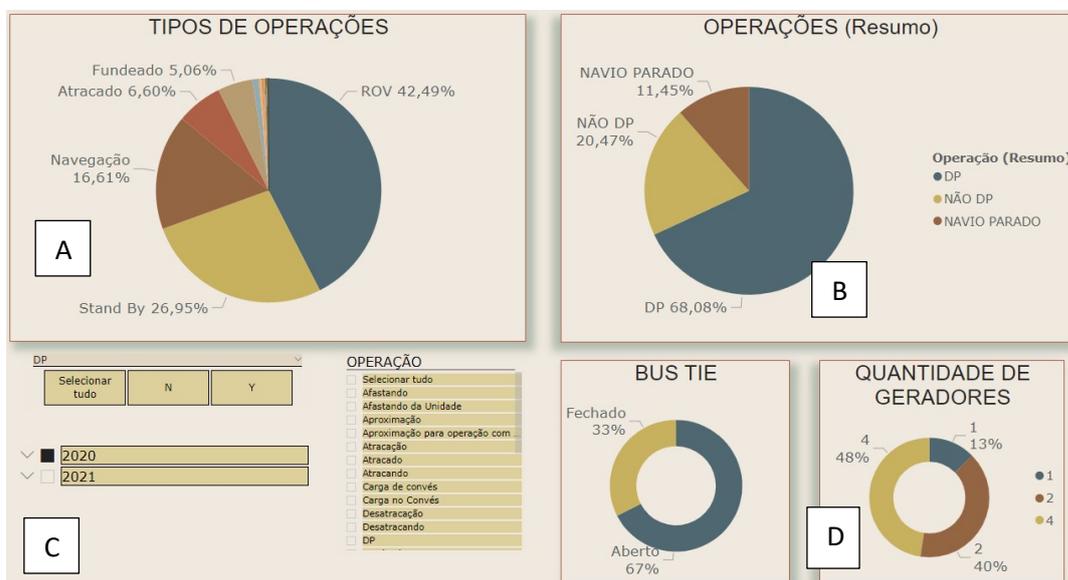


Figura 38: Dashboard/painel de operações do navio.

A Figura 39 mostra o segundo painel desenvolvido, a partir do qual é possível obter a relação diária de operações do navio. Cada barra representa um dia e as diferentes cores significam as diversas operações realizadas pelo navio. Um filtro no painel permite que sejam verificadas estas operações num intervalo de apenas um dia, mês ou então para todo o intervalo de dados, aumentando a versatilidade do painel. Esta segunda visão é particularmente importante para identificar os dias-chaves que contemplam o maior número de operações, além de revelar em quais destes dias tais operações ocorreram num intervalo de tempo relevante para aquisição dos dados. Com estas informações, foi possível selecionar os dias para o tratamento de dados completo. No tópico 5.1 dos resultados, serão exibidos os gráficos obtidos para cada mês estudado.

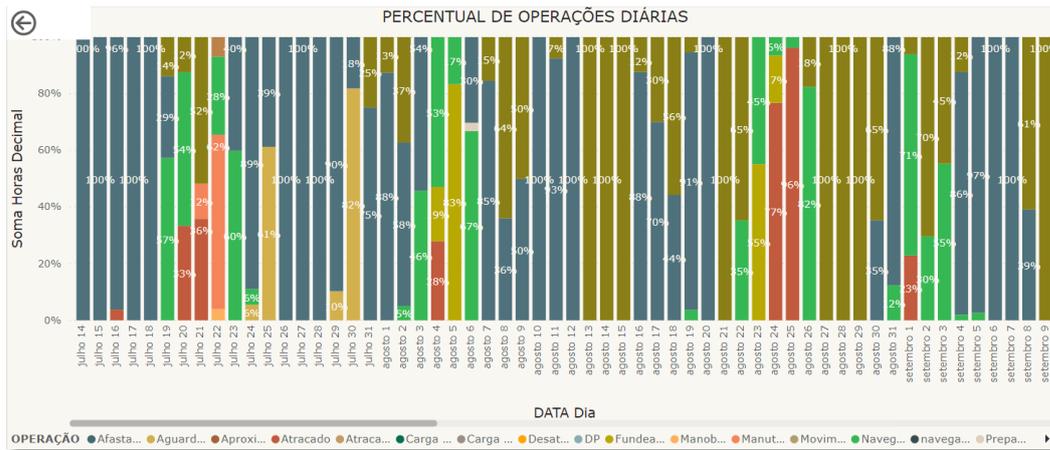


Figura 39: Relação diária de operações do navio.

4.4

Definição dos parâmetros de fábrica dos motores

Após realizada a primeira etapa do diagnóstico, sendo conhecidos os modos de operação do navio, agora é necessário conhecer o comportamento do sistema de geração de energia do navio.

Os objetivos desta etapa englobam a identificação e compreensão do comportamento do sistema de geração de energia em cada uma das operações identificadas através dos painéis de operação da embarcação. Os interesses aqui são, principalmente, a identificação do nível de potência alcançado nas operações, os consumos específicos em cada operação e o nível de variação de carga para cada um dos modos de funcionamento do navio.

Para avaliar a eficiência dos motores em cada uma das operações é calculado o consumo específico de combustível (SFC da sigla em inglês *Specific Fuel Consumption*). O SFC mede o consumo em litros por hora necessário para gerar um kW de potência no motor. O seu cálculo é dado pela eq. (6) abaixo:

$$SFC = \frac{\text{Consumo} \left[\frac{L}{H} \right]}{\text{Potência} [kW]} \quad (6)$$

Observa-se através da eq. (6) que, quanto maior o valor do SFC, maior será o consumo de combustível para gerar 1kW de potência, ou seja, menos eficiente será a operação do motor, levando a maiores níveis de consumo e emissões.

A Tabela 1 contém os dados de projeto para potência [kW], consumo [L/h] e consumo específico [(L/h)/kW] do motor CAT3512C [82], o mesmo utilizado nos 4 motores do SGE da embarcação objeto deste estudo. Observa-se que estes valores foram adquiridos para o motor operando de forma estacionária em cada ponto de operação.

Tabela 1: Dados do motor CAT3512C fornecidos pelo fabricante. Fonte: [82]

% kW	kW	FC (L/H)	SFC [L/H/(kW)]
100	1630	411,80	0,253
90	1467	373,30	0,254
80	1304	338,20	0,259
75	1222	321,40	0,263
70	1141	302,70	0,265
60	978	260,60	0,266
50	815	213,70	0,262
40	652	176,00	0,270
30	489	139,80	0,286
25	408	122,00	0,299
20	326	105,20	0,323
10	163	72,70	0,446

No tópicos 5.3 dos resultados, serão exibidas as equações relacionando os dados de taxa de consumo de combustível (FC da sigla *Fuel Consumption*) e consumo específico (SFC) em função dos valores de potência, englobando toda a faixa de operação dos motores.

4.5

Diagnóstico do sistema de geração de energia

Após a definição das operações do navio, e do tratamento dos dados fornecidos pelo fabricante para os motores utilizados na embarcação, procedeu-se com a análise do comportamento dos motores quanto ao consumo e potência para cada tipo de operação. Com esta finalidade, um novo painel foi gerado de maneira a obter o comportamento dos motores em cada operação realizada. Na Figura 40, percebe-se um exemplo do painel gerado para as potências dos geradores, de acordo com as operações realizadas. Observa-se o valor da média de potência calculada para cada gerador (Média de *Load kW*), o valor máximo (Máximo de *Load kW*) e o desvio padrão encontrado (Desvio Padrão de *Load kW*). Cada gerador foi identificado por uma cor específica na legenda do painel. Destaca-se que, na cor rosa no gráfico, foi desenhada uma linha com o somatório das potências no intervalo analisado.

A fim de relacionar o quão transiente cada operação seria, optou-se por utilizar o Coeficiente de Variação (CV) de cada amostra selecionada. Como os resultados dos CV são dados em valor percentual, pode-se obter uma comparação direta entre os diferentes tipos de operações, avaliando o comportamento da carga entre uma faixa mais estável ou estacionária até variações mais intensas, levando a um comportamento transiente.

Para este estudo, arbitrou-se uma classificação quanto a esta variação, como visto a seguir:

- Para valores de CV inferiores a 5%, o comportamento é classificado como ESTACIONÁRIO;
- Para valores de CV entre 5% e 9%, o comportamento é classificado como POUCO TRANSIENTE;
- Para valores de CV acima de 9%, o comportamento é classificado como TRANSIENTE.

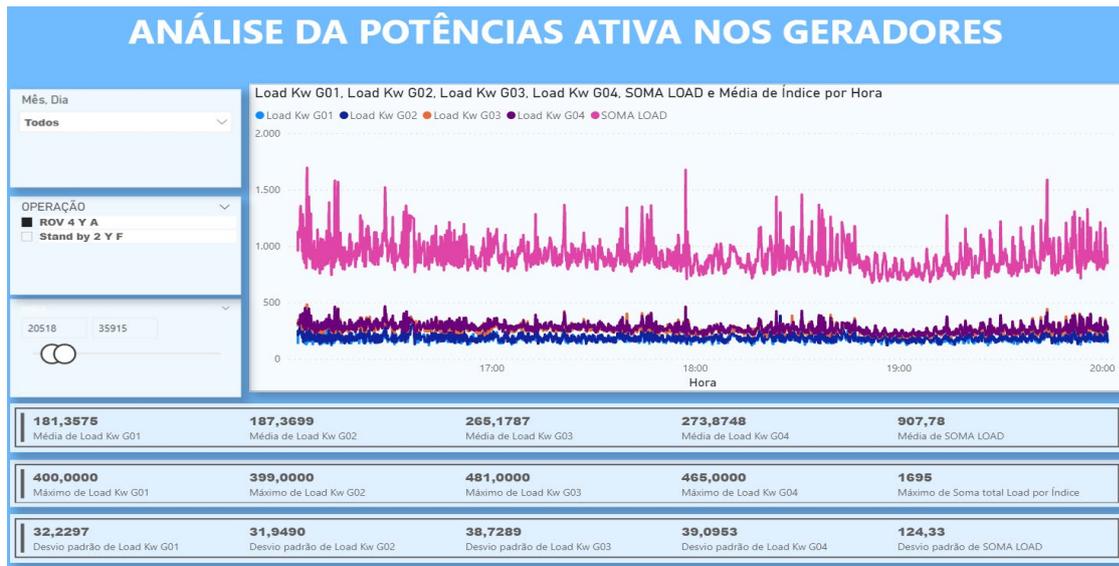


Figura 40: Painel para dados de potência dos motores.

Para demonstrar a relação do CV com os diferentes tipos de operações, foram escolhidos intervalos de dados, contemplando diferentes tipos de operações, desde aquelas em que o navio está realizando operação em porto ou atracado, passando pelas operações em que o mesmo se encontra navegando em velocidade de cruzeiro, finalizando nas operações em que ocorre o posicionamento dinâmico. Os resultados podem ser vistos no tópico 5.4 deste trabalho.

4.6

Definição do simulador

Após processar os dados com o auxílio do *Power Query*, como já descrito no tópico 4.3.1, os dados aquisitados pelo navio foram transferidos para uma planilha de Excel, onde a simulação foi realizada. Deve-se lembrar que os dados de potência e consumo do navio foram coletados com o intervalo de 1 segundo entre eles. No entanto, preferiu-se trabalhar com a unidade de tempo em horas. Logo, o intervalo de mediação passou a ser de $2,78 \cdot 10^{-4}$ horas (valor de $1/3600$ de hora).

O simulador elaborado no programa Excel foi dividido em diferentes planilhas e definido da seguinte forma:

4.6.1

Entrada dos dados de configuração do simulador

Nesta planilha do arquivo, são inseridos os dados relativos à configuração dos motores, dados da configuração da bateria, além das configurações do sistema de refrigeração do container como descrito a seguir:

- DADOS DOS MOTORES

Como visto na Figura 41, neste primeiro formulário, devem ser inseridas as 2 informações a seguir:

- a) N° de motores em operação:

É possível escolher entre 1, 2 ou 4 motores. Esta seleção definirá, para o uso do sistema de geração com hibridização, quantos motores estarão em operação juntamente com o banco de baterias.

b) Valor máximo de potência [kW]:

Neste campo, deve ser inserido um valor limite para a potência do motor, de maneira que, caso algum dos motores ultrapasse este valor, um alerta será mostrado. Este valor é determinado para evitar que algum motor trabalhe com carga excessiva, diminuindo, desta forma, sua vida útil.

Figura 41: Entrada da configuração do motor.

- **DADOS DA BATERIA:**

Como pode ser visualizado na Figura 42, são solicitadas algumas características próprias da bateria, tais como:

a) Perdas da bateria%:

Representa a perda percentual da bateria devido a ineficiência interna da mesma.

b) Min SOC%:

Determina o valor mínimo do SOC permitido para a bateria em %.

c) Max SOC%:

Determina o valor máximo do SOC permitido para a bateria em %.

d) Max CR:

Valor máximo do CR permitido para a bateria.

CONFIGURAÇÃO DA BATERIA

Perdas da bateria %: 7

Min SOC %: 20

Max SOC %: 80

Max CR: 4

Novo Registro

Novo

Excluir

Restaurar

Localizar ante

Localizar próx

Critérios

Fechar

Figura 42: Dados de entrada da bateria.

- DADOS DE REFRIGERAÇÃO DO CONTAINER:

A Figura 43 mostra a lista de parâmetros que devem ser configurados para o sistema de refrigeração do container, sendo eles:

a) (COP do sistema de refrigeração):

Coeficiente de desempenho do refrigerador utilizado no container

b) (Temperatura média externa do ar):

Temperatura média externa da região onde o navio vai operar.

c) (Temperatura média interna do ar):

Temperatura em que o sistema deve ser mantido para efeito de segurança dos equipamentos e para otimizar o seu comportamento.

CONFIGURAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO

COP do Sistema: 3

Temp Externa °C: 27

Temp Interna °C: 17

Novo Registro

Novo

Excluir

Restaurar

Localizar ante

Localizar próx

Critérios

Fechar

Figura 43: Dados de entrada do sistema de refrigeração.

Há a possibilidade de inserir outros dados de entrada no simulador, no entanto, para este trabalho, estes dados serão mantidos constantes. São eles: as dimensões e materiais constituintes do container, necessários para determinar a carga térmica solar que penetra no container; os critérios para penalização pelo comportamento transiente dos motores que dependem das características específicas do SGE e devem ser avaliadas em cada caso. Devido à sua complexidade, estes dois últimos fatores merecem uma explicação mais elaborada, o que será realizado nos tópicos seguintes.

4.6.2

Cálculo da penalização dos motores

A fim de prever o comportamento do motor nas condições reais de operação, considerando os efeitos transientes do motor, inicialmente, tentou-se obter uma equação através da aplicação de método de regressão multivariável, considerando como variáveis independentes a carga do motor e o CV da operação, e a variável dependente, o consumo. No entanto, devido aos problemas já relatados anteriormente no tópico 4.3.1, foram encontradas dificuldades no tratamento dos dados, havendo algumas inconsistências com os valores. Além disso, cabe ressaltar que as operações do navio não ocorrem sempre com os motores operando na mesma faixa de carga. Por exemplo, para a operação em posicionamento dinâmico (DP) com 4 Motores em operação, as faixas de carga dos 4 motores permanecem em torno de 100kW a 400kW. Já para a operação com a embarcação navegando com 2 motores em velocidade de cruzeiros, as faixas de operação passam a ser em torno de 700kW a 1000kW para cada motor. Mesmo obtendo os valores de CV para ambos os casos de operação, não há como compará-los diretamente, já que foram medidos com diferentes faixas de operação dos motores. Para contornar este problema, foi realizada uma comparação entre os dados de projeto e os dados reais de um dos motores do navio avaliado, coletados em diferentes operações, de acordo com os seus CVs. Para tal, realizou-se um filtro nos dados de operação real do navio, separando-os pelo CV obtido em diferentes operações. Os CVs escolhidos foram:

$$CV = 10,02\%;$$

$$CV = 8,8\%;$$

$$CV = 4,6\%;$$

$$CV = 2,87\%.$$

Como o intuito, nesta análise, foi compreender o comportamento de um motor com relação à sua transiência, foi coletado apenas os dados de um único motor, neste caso o G1, para que não houvesse interferência nos resultados devido pela variação dos motores. Para este motor, obteve-se, através das informações coletadas no navio, os dados de potência em kW e consumo em L/h, em cada ponto da operação do G1 nas diferentes operações reais com os CVs citados acima.

Já o consumo de projeto, tido como ideal neste trabalho, foi obtido através dos dados fornecidos pelo fabricante, constantes na Tabela 1 para o FC. Através dos dados desta tabela, uma equação relacionando o consumo do motor em L/h e a potência gerada pode ser gerada através de regressão como será visto no tópico 5.3 na seção de resultados. Logo, utilizando a mesma potência obtida em cada ponto da operação do G1, pode-se calcular o consumo ideal do motor. Tendo em mãos os resultados de projeto, estes serão comparados com o consumo real utilizando a eq. (7), obtendo, desta forma, a diferença percentual entre os dois consumos.

$$DifCons = 100 * \frac{(ConsProj - ConsReal)}{ConsProj} \quad (7)$$

Em que:

ConsProj = Consumo de Projeto calculado;

ConsReal = Consumo Real medido;

DifCons = Diferença Percentual entre Consumo de Projeto e Consumo Real.

Todos os valores de diferença percentual foram agrupados de acordo com o CV da operação. Em seguida, para o Rol dos dados, foi obtido um valor médio desta diferença. Este valor então foi considerado como a diferença média percentual entre o Consumo de Projeto e o Consumo Real para o CV avaliado. A análise do CV, assim como os valores de penalização atrelados às operações transientes serão mostrados no tópico 5.4.1 na seção de resultados.

4.6.3

Cálculo da Carga Térmica

O sistema que compõe o banco de baterias, além dos outros componentes eletrônicos, é confinado em um container semelhante ao esquematizado na Figura 44. Como visto na Figura 43, as temperaturas médias externas e internas do container também são inseridas no simulador. A temperatura externa é obtida pelo histórico anual da região em que o navio opera, neste caso, Rio de Janeiro. A temperatura interna pode ser baseada na média da temperatura em que a bateria opera com segurança.

Para este container, foram utilizados os seguintes parâmetros, que são as dimensões aproximadas de um container de 6 metros de comprimento, comumente utilizados para aplicação com baterias:

Dimensões do Container:

H: 2,4m

L: 2,4m

C: 6m

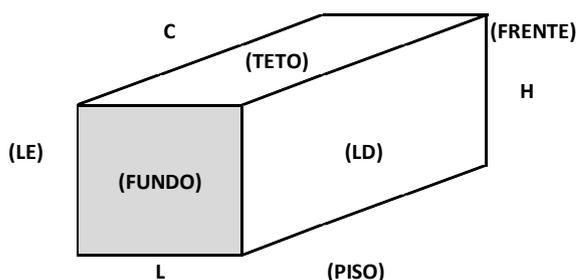


Figura 44: Dimensões de container da bateria.

Para a espessura das paredes do container, tem-se, uma combinação de dois materiais. A seguir, na Tabela 2, tem-se as espessuras de cada material (além dos seus respectivos coeficientes de condução) retirado de Schmitz [83].

Tabela 2: Propriedade dos materiais de composição do container. Fonte: [83]

MATERIAIS	Largura (m)	k(W/(m*K))
Isolamento (Poliuretano)	0,07	0,0235
Estrutura (Aço) Camada dupla	0,0025	71

Para o cálculo da carga térmica que penetra no container, devido ao efeito do Sol, foi utilizado o procedimento estabelecido pela norma ASHRE [84]. Esta norma refere-se à carga de calor sensível que penetra pelas paredes do container, como Carga de Transmissão ou CT. De acordo com a referida norma a carga CT, calculada em W, é dada pela eq. (8).

$$CT_{parede} = U * A_{parede} * \Delta T \quad (8)$$

Em que:

U: Coeficiente global de Convecção [W/m².K].

A_{parede}: Área de cada parede do container [m²].

ΔT: Diferença de temperatura entre o ar externo e interno do container, dado em Kelvin[K].

Para o ΔT, a norma ASHRE [84] fornece uma tabela para o seu ajuste, pensando o efeito solar na carga de calor. A tabela abaixo se refere ao acréscimo de temperatura, em Kelvin, para cada parede, de acordo com o seu posicionamento, além do tipo de pintura utilizada na superfície.

Tabela 3: Tabela de incremento de temperatura para cálculo do calor de penetração. Fonte: [84]

Tipo de superfície	Posicionamento			
	Leste	Sul	Oeste	Norte
Pintura negra	5	2	5	11
Pintura Vermelha, Verde ou Cinza	4	3	4	9
Pintura Branca	3	2	3	5

Para o container, considerou-se o caso da pintura Vermelha, Verde ou Cinza.

De acordo com a norma ASHRE [84], para paredes finas, pode-se adotar a eq. (9) para o cálculo do valor do Coeficiente global de transferência de calor.

$$U = \frac{1}{x_1/k_1 + x_2/k_2 + x_1/k_1} \quad (9)$$

Em que x representa a espessura [m] e K o coeficiente de condução[W/((m*K))] para cada um dos materiais que compõem a parede.

No tópico 5.4.2 da seção resultados, será mostrado o cálculo da carga térmica de penetração realizado para este trabalho.

4.7

Cálculos do simulador

No Excel, foram criadas diferentes planilhas, cada uma relacionada com o tipo de estratégia adotada para o uso da hibridização. Nelas, são alocados os dados reais do sistema

de geração de energia, adquiridos pelo navio. Após o tratamento realizado no *Power Query*, o pacote de dados é inserido já no formato correto na planilha do Excel, através do processo de importação de dados. A Figura 107 do Apêndice mostra um exemplo desta inserção com as informações que são importadas através dos dados já tratados pelo programa *Power Query*.

São inseridos seguintes dados:

- ÍNDICE: representa um número de rastreamento dos dados;
- OPERAÇÃO: tipo de operação realizada pelo navio;
- HORADecimal: número que representa o instante do dia em que a mediação foi realizada, com unidade em hora;
- POTÊNCIAS G1; G2; G3; G4: representam as demandas do sistema absorvidas por cada motor na operação;
- \sum CARGA: soma das cargas em kW, representando a demanda do sistema no instante da aquisição;
- CONSUMO G1; G2; G3 e G4: significam os consumos em Litros por hora de cada um dos motores do SGE;
- SFC G1; G2; G3 e G4: representam os consumos específicos de cada um dos motores no instante da aquisição.

4.8

Estratégias de operação com a hibridização

Para a operação hibridizada, que deve ser simulada, há a elaboração de diferentes estratégias para o uso do SGE conjuntamente com o banco de baterias. Todas as estratégias adotadas no simulador buscam, como objetivo principal, a redução do consumo no navio através da gestão de energia. A primeira estratégia adotada é denominada de DMS (Sigla para dados de média simples). Nela, é utilizada, como parâmetro para a operação do SGE, o valor da média simples de todas as potência de demanda adquiridas no intervalo selecionado para uma operação específica. Para efeito deste trabalho, o valor da média da potência demandada será denominado de CARGA MÉDIA. Neste caso, o motor ou conjunto de motores operam numa carga permanente, sempre buscando operações próximas a faixa ótima de eficiência, de acordo com o seu SFC. Ressalta-se, de acordo com os valores fornecidos pela Tabela 1, que há uma tendência de melhoria de desempenho relacionado ao consumo específico com o aumento da potência do motor. Desta forma, ficou estabelecido que a prioridade seria a utilização do menor número de motores possíveis em cada operação, elevando, assim, a potência gerada nestes motores, aproximando-se das faixas de melhores eficiências de consumo. Como restrição, determinou-se que a potência máxima de cada motor não ultrapassasse 1000kW para evitar a sobrecarga deles. Ressalta- que o número de motores operando na hibridização é um parâmetro de entrada do simulador e pode ser configurado para a utilização de um, dois ou quatro motores, todos operando com cargas simétricas. A única restrição seria que, pelo menos, um motor estivesse em funcionamento durante toda a operação por restrições relacionadas à segurança de navegação. Considerou-se também a premissa de que a bateria, inicialmente operaria com SOC de 80% e que as cargas transientes demandadas pelo navio deveriam ser absorvidas pela bateria que, ora entrega potência ao barramento, quando a demanda é maior que potência gerada pelo SGE, ora é abastecida, quando o SGE gera mais potência que a carga demandada. O gráfico da Figura 45 elucida um exemplo deste comportamento, em que se observa a demanda total do sistema em verde, a potência fornecida pela/para a bateria em vermelho e a potência fornecida pelos motores, na linha

reta em preto. Observa-se que os motores, representados pela linha preta mantêm sua carga permanente enquanto a bateria acompanha a demanda transiente do sistema, complementando a necessidade de potência solicitada pelo navio. Quando a demanda de carga do navio é maior que a potência fornecida pelo motor, a bateria fornece o excedente de potência, já quando a demanda é menor, parte da potência do motor é utilizada para recarregar a bateria.

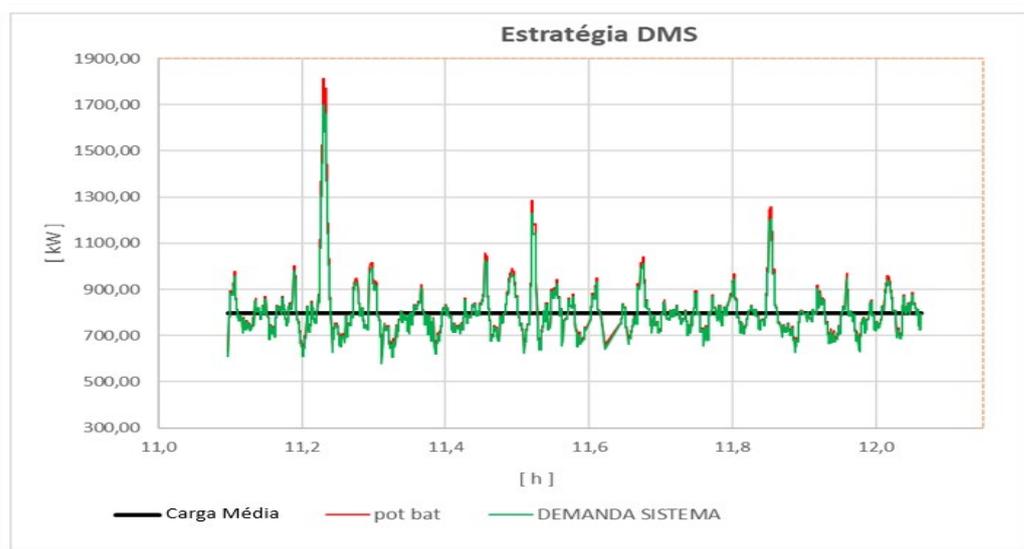


Figura 45: Gráfico relacionando potência do motor representado pela linha preta, da bateria em vermelho e da demanda em verde para a estratégia DMS em que o motor se mantém fornecendo uma carga estática enquanto as variações de potência são absorvidas pela bateria.

4.8.1

Cálculo da potência do motor e da bateria

Como já citado anteriormente, deve-se calcular a média da potência demandada pelo sistema durante toda a operação analisada. Na simulação com a hibridização, este valor médio de potência, denominado neste trabalho como **Carga Média**, será então redistribuído para os motores do SGE, de acordo com a seleção de número de motores em operação. A Figura 108, no apêndice, mostra um exemplo da planilha preenchida com o valor da Carga Média e com os valores dos respectivos motores denominados G1, G2, G3 e G4. Neste exemplo, foi utilizado a seleção de apenas um motor em operação na estratégia DMS, logo toda a potência é fornecida apenas pelo motor G1. Já na Figura 109, também do apêndice, pode-se ver o mesmo exemplo anterior, mas agora com a seleção de dois motores em operação na estratégia DMS. Percebe-se que os dois motores G1 e G3 estão compartilhando igualmente o valor da potência média. Neste caso, obviamente, as cargas dos motores são consideravelmente menores que no primeiro caso e, portanto, o seu valor de SFC tende a ser mais alto, provocando uma operação com menor eficiência em consumo.

Como visto no tópico 4.7, a soma das cargas em kW, representando a demanda do sistema no instante da aquisição é dada no simulador pela coluna (Σ Carga), como pode ser observado na Figura 107 constante no Apêndice. Já a potência gerada pelos motores em cada uma das estratégias utilizadas é dada pela coluna denominada **Carga Média**, conforme Figura 108 e Figura 109 do Apêndice. Para o cálculo do valor da potência da bateria em cada segundo medido, é feita, então, o seguinte procedimento de cálculo, como visto na eq. (10):

$$\begin{aligned}
 \text{Potência da bateria} &= \text{Potência dos motores} - \text{Potência da demanda} \\
 &\text{ou} \\
 \text{Potência da bateria} &= \text{Carga Média} - \sum \text{Carga}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Neste caso, tem-se duas possibilidades para o valor da potência da bateria: se positiva, a bateria está sendo carregada e se negativa, ela está descarregando, entregando potência para o barramento. No entanto, para a bateria, há que se considerar as suas perdas, tanto no seu processo de carregamento quanto no processo de descarga. A seguir, serão postas todas as considerações feitas quanto a estas perdas. No tópico 2.5.2, foi observado que a bateria possui uma perda associada ao efeito Joule causado pela resistência interna da bateria, além outras perdas associadas aos componentes eletrônicos que compõem o banco de baterias. Para este trabalho, a variável referente a essa ineficiência será denominada de φ_T . De acordo com alguns fabricantes, este fator pode variar entre 5% e 7% para baterias de Lítio. [85],[86]

O valor da potência dissipada pela bateria é dado pela eq. (11):

$$\text{Pot Dis} = \text{Pot Bat} * \varphi_T. \tag{11}$$

Em que:

Pot Dis é a potência dissipada pela bateria;

Pot Bat é a potência gerada pela bateria;

φ_T é a ineficiência da bateria.

Como já visto no tópico 4.6.3, há também a entrada de carga de penetração dentro do container. Esta carga juntamente com a potência dissipada pela bateria são responsáveis pelo aquecimento do container que deve ter a sua temperatura controlada. A variável que representa o calor gerado pela carga de penetração será denominado de **Pot Sol**. Para retirar este calor provocado pela ação conjunta do calor de penetração mais a dissipação pela própria bateria, é necessário a instalação de um sistema de refrigeração no container. De forma simplificada, considera-se que a potência necessária pelo sistema de refrigeração (**Pot Ref**) será dada pela seguinte eq. (12).

$$\text{Pot Ref} = \frac{\text{Pot Sol} + \text{Pot Dis}}{\text{COP}} \tag{12}$$

Sendo:

Pot Ref: Potência de Refrigeração do sistema;

Pot Sol: Calor gerado pela carga térmica de penetração no container;

Pot Dis: Potência dissipada pela bateria;

COP: Coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração.

Como a **Pot Ref** deve ser considerada para o consumo final do sistema, ela também é considerada como uma perda da bateria, sendo análogo o raciocínio de que a potência para a operação do refrigerador do container será proveniente da própria bateria.

Logo, como perdas da bateria no processo, tem-se a eq. (13) :

$$\begin{aligned}
 \text{Perdas} &= \text{PotDis} + \text{Pot Ref} \\
 \text{Perdas} &= \text{PotDis} + \frac{\text{Pot Sol} + \text{Pot Dis}}{\text{COP}}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

O cálculo da potência líquida da bateria deve ser fornecido considerando estas perdas, como já citado. No entanto, há duas situações a serem analisadas separadamente. A primeira refere-se a quando a potência gerada pelos motores é maior que a demanda e a bateria passa a ser carregada com o excedente e a segunda, quando a demanda é maior que a potência gerada pelos motores e há a necessidade do uso da potência da bateria para absorver a carga excedente da demanda:

No primeiro caso, para a situação em que a bateria está sendo carregada, ou seja *Potência da demanda* (WD) < *Potência dos motores* (WM), tem-se o resultado para a potência líquida da bateria dada pela eq. (14):

Faz-se:

$$\text{Pot Bat} = \text{Potência dos motores} - \text{Potência da demanda} - \text{Perdas}$$

Para simplificar, a potência dos motores será denominada de WM e a potência da demanda de WD , logo:

$$\text{Pot Bat} = WM - WD - \text{Perdas}$$

Sabe que:

$$\text{Perdas} = \text{Pot Ref} + \text{Pot Dis}$$

Procede-se então:

$$\text{Pot Bat} = WM - WD - (\text{Pot Ref} + \text{Pot Dis})$$

Mas:

$$\text{Pot Ref} = \frac{\text{Pot Sol} + \text{Pot Dis}}{COP} = \frac{\text{Pot Sol} + (\text{Pot Bat} * \varphi_T)}{COP}$$

Logo:

$$\text{Pot Bat} = WM - WD - \left(\frac{\text{Pot Sol} + (\text{Pot Bat} * \varphi_T)}{COP} + \text{Pot Bat} * \varphi_T \right)$$

Reorganizando, chega-se à eq. (14):

$$\text{Pot Bat} = \frac{((WM - WD) - [(COP^{-1}) * Pot Sol])}{1 + [\varphi_T * (1 + (COP^{-1}))]} \quad (14)$$

O valor encontrado para a potência da bateria será menor que o calculado sem as perdas, indicando que a bateria sofrerá uma penalização no seu processo de carregamento, atrelada às ineficiências.

Para o segundo caso, com a bateria descarregando, tem-se que $WD > WM$.

Neste caso:

$$\text{Pot Bat} = WD + \text{Perdas} - WM$$

Utilizando o mesmo processo de decomposição realizado no primeiro caso, chegamos à eq. (15) para a potência da bateria:

$$\text{Pot Bat} = \frac{((WM - WD) + [(COP^{-1}) * Pot Sol])}{1 - [\varphi_T * (1 + (COP^{-1}))]} \quad (15)$$

Neste caso, a potência solicitada à bateria para suprir o excesso de demanda passa a ser maior, quando levadas em conta as perdas, ou seja, a bateria vai descarregar mais rápido, nesta consideração. A Figura 110 do Anexo revela um seguimento da planilha do simulador em que os cálculos citados acima são realizados. Nela, a potência da bateria considerando as perdas, aparece como **Pot(net)Bat**. O seu cálculo é realizado avaliando o valor imediatamente anterior da variável **PotBat** (potência da bateria sem considerar as perdas) quanto ao seu sinal, ou seja, caso **PotBat** seja positivo (bateria sendo carregada), a **Pot(net)bat** será calculada pela eq. (14), caso contrário, usa-se a eq. (15). A coluna **EnerBat**, também constante na Figura 110 do Anexo, se refere à energia da bateria em cada intervalo de tempo aferido que é calculada em kWh. Ela é obtida multiplicando a potência líquida da bateria **Pot(net)Bat** pelo diferencial do tempo denominado de **dif HD** dado em unidade de hora. Logo, tem-se a variação de energia em cada segundo, calculado em kWh. A coluna seguinte **EnerAcum** tem o valor acumulado desta energia, sendo incrementado a cada segundo. Sua unidade também é a de kWh. Observa-se que, calculando a diferença entre o valor inicial e final da coluna **EnerAcum**, tem-se o valor líquido da quantidade de energia na bateria, para a operação simulada. A diferença entre estes valores mostra o quanto de acúmulo ou decréscimo de energia ocorreu na bateria na operação. O gráfico da Figura 46 exemplifica a variação da energia da bateria durante uma operação. de hora. Logo, tem-se a variação de energia em cada segundo, calculado em kWh.

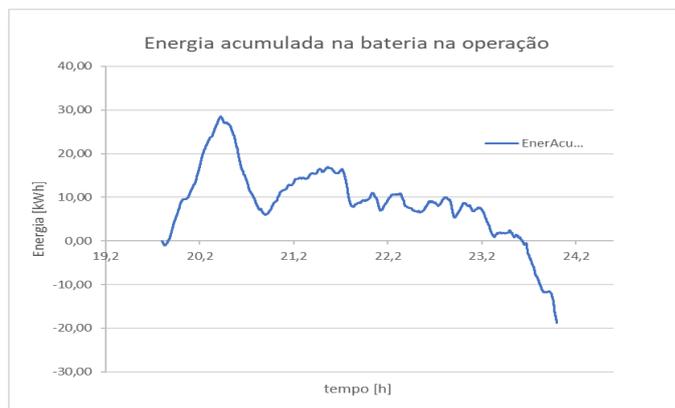


Figura 46: Gráfico com exemplo da energia acumulada na bateria durante uma operação simulada.

4.8.2

Cálculo do *State of Charge* (SOC)

O SOC é a medida do nível de energia da bateria. Ele é um parâmetro importante para o gerenciamento da bateria, sendo fornecido em sua forma percentual. Neste trabalho, o SOC é calculado dividindo a energia acumulada da bateria **Ener Acum**, na Figura 110 do Anexo, pelo valor da capacidade total de armazenamento de energia da bateria. Observa-se que, como a **Ener Acum** varia com o tempo, o valor de SOC também irá variar.

No simulador, foram inseridas 6 opções de baterias, conforme suas capacidades de armazenamento de energia. Sendo elas:

- 100kWh;
- 200kWh;
- 300kWh;
- 400kWh;

- 500kWh;
- 600kWh.

Os valores de SOC são calculados, para cada bateria, variando com o tempo, como pode ser visto na Figura 111 do anexo. Após cada operação, um gráfico com a variação do SOC durante o período avaliado é confeccionado, como visto no exemplo da Figura 47, podendo, desta maneira, verificar a diferença na variação do SOC para as baterias, de acordo com suas capacidades de armazenamento.

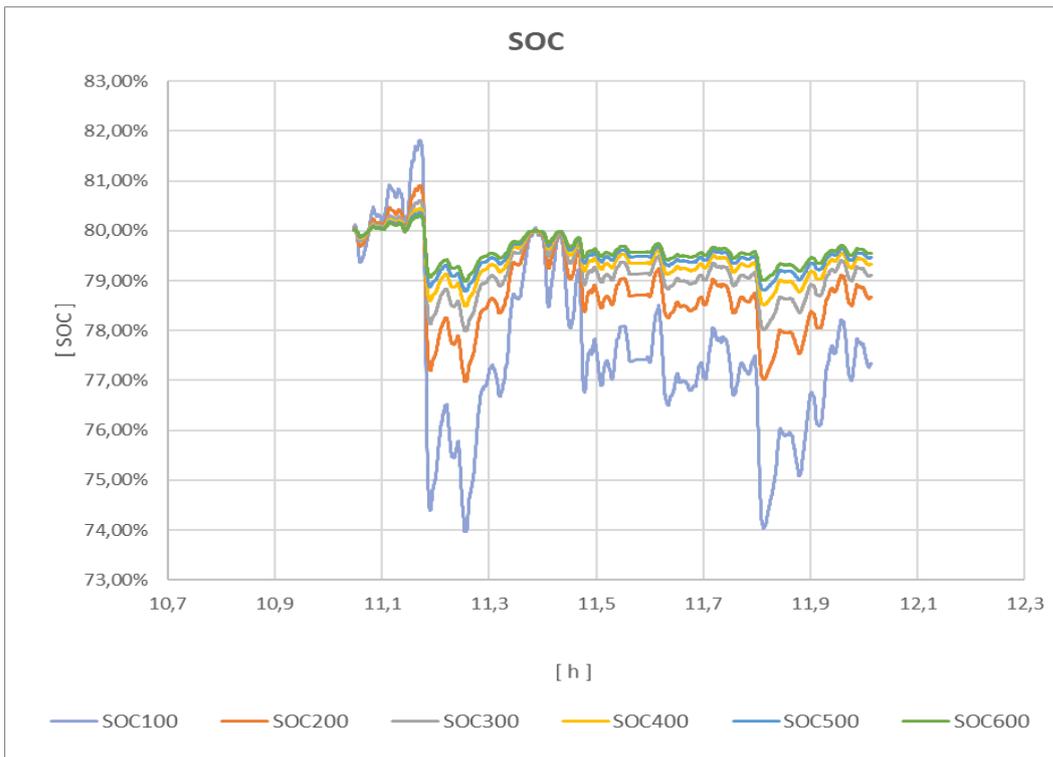


Figura 47: Gráfico com a variação do SOC para cada tipo de bateria analisada.

4.8.3

Cálculo do Coulomb Rate (CR)

O CR representa a velocidade em que uma bateria pode ser carregada e descarregada e está atrelado à quantidade de potência que esta bateria pode entregar para o sistema por um determinado tempo. De forma semelhante ao cálculo efetuado para o SOC, calculam-se os valores de CR para cada tipo de bateria, variando de 100kWh até 600kWh. Neste caso, no entanto, o cálculo foi realizado de acordo com a eq. (16):

$$CR = \frac{Pot(net)Bat [kW]}{Capacidade\ máxima\ de\ armazenamento [kWh]} \quad (16)$$

Neste cálculo, obtém-se como resultado valores positivos ou negativos, dependendo se a bateria está sendo carregada ou descarregada. Contudo, o valor de interesse para a análise é o módulo do CR, que, apesar de ter sua unidade em [1/h], é comumente apresentado sem unidade de medida. No gráfico da Figura 48, observa-se um exemplo de aquisição com os diferentes valores de CR variando no tempo. Através da análise dos dados, juntamente com a observação dos gráficos, é possível verificar quais

baterias podem ser aplicadas em cada operação, de acordo com o seu CR máximo de projeto.

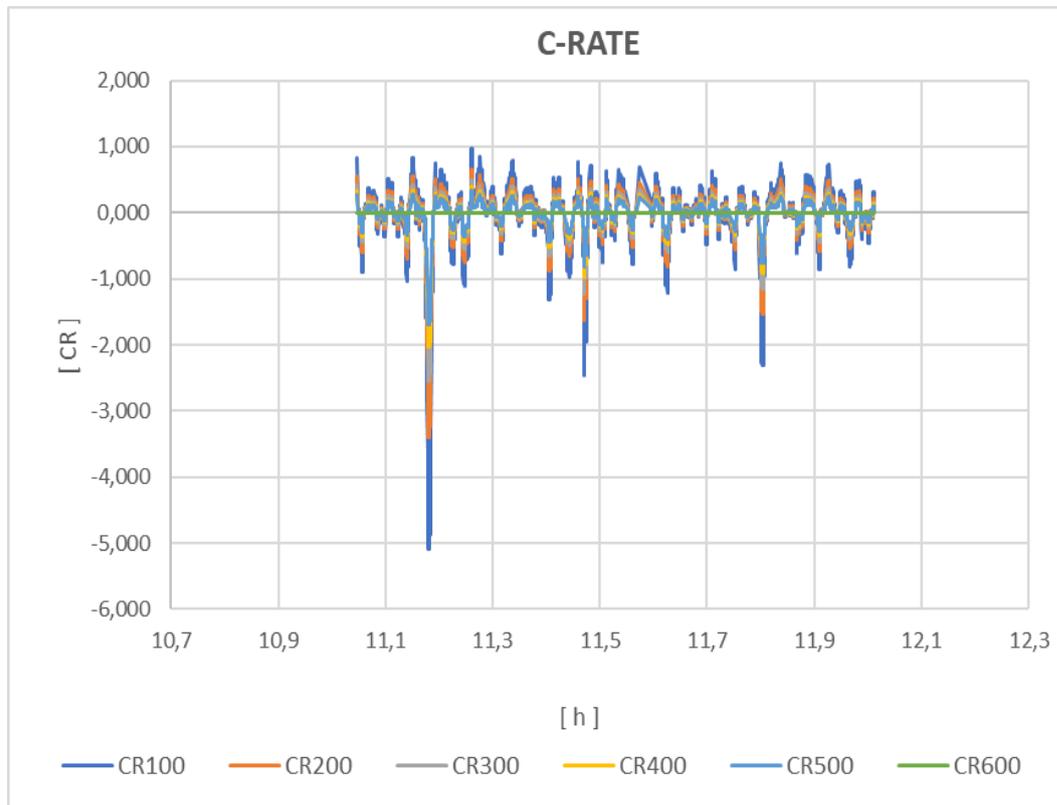


Figura 48: Variação do CR para diferentes tipos de baterias, de acordo com suas capacidades.

4.8.4

Cálculo do Consumo

Uma parte fundamental do simulador é a comparação entre os consumos do SGE antes e depois da aplicação do sistema de hibridização. Na Figura 112 do Anexo, há um exemplo retirado do simulador com os dados de consumo em L/h sem a bateria, coletados para cada um dos motores, segundo a segundo, localizados nas colunas **CONSG1** até **CONSG4**. Já as colunas **AcumConsG1** a **AcumConsG4** referem-se ao acumulado do consumo de cada motor. Observa-se também a coluna denominada **Acum Σ Cons** que contém o consumo acumulado total, ou seja, o acumulado do somatório de todos os motores.

Com os dados do consumo do sistema na sua aplicação convencional, sem o uso da hibridização, é necessário, agora, realizar o cálculo do consumo na utilização do SGE em conjunto com as baterias. Para isto, será necessário utilizar a equação obtida dos dados de projeto que relaciona consumo em litros por hora com potência do motor dada em kW. Tal equação será mostrada no tópico 5.3 dos resultados. Lembrando que, de acordo com o tópico 4.6.2, uma penalização atrelada ao valor do CV da operação deve ser considerada. No entanto, para o caso da estratégia DMS, os motores operam com potência constante durante todo o processo, ou seja, com Coeficiente de Variação (CV) nulo. Desta forma, considera-se que a sua relação de Potência x Consumo será a mesma obtida pela curva de projeto, ou seja, sem penalização.

A Figura 113 do Apêndice representa as colunas do simulador em que os consumos de cada motor, quando utilizados em conjunto com a bateria, são calculados. As colunas **G1** a **G4** representam os consumos em L/h, calculados pela equação para o Consumo de Combustível de projeto, baseado nos dados do fornecedor que estará disponível no tópico 5.3 dos resultados. Ao valor obtido por esta equação, é acrescida a penalização devido ao CV da operação hibridizada, quando aplicado. A coluna **Consumo Total** é o somatório dos consumos em L/h de todos os motores, multiplicado pelo intervalo de tempo (1 segundo), dando o consumo imediato em litros. Por fim, a coluna **Consumo Total Acumulado** é o acúmulo no tempo do consumo de todos os motores, dado também em litros.

Após todos os processos descritos, são adquiridos, por fim, os valores acumulados dos consumos do navio, com e sem a bateria, sendo fornecidas as seguintes informações:

- Consumo total em litros sem a bateria;
- Diferença em litros dos consumos;
- Diferença percentual entre os consumos e período avaliado.

Foram realizados os cálculos para as diferentes estratégias com o uso das médias simples e móveis para o valor da potência dos motores operando em conjunto com o banco de baterias durante o processo. Como o valor da média móvel varia com o tempo, dependendo do intervalo de dados para a sua atualização, para estas novas estratégias, não há mais um valor fixo para a potência do SGE, como ocorre na estratégia do DMS. Nestes casos, os valores das potências dos motores “flutuam” suavemente.

Para verificar o comportamento com diferentes valores de médias móveis, foram realizados cálculos utilizando as seguintes:

- MM50 = Cálculo da média móvel, variando a cada 50 segundos;
- MM100 = Cálculo da média móvel, variando a cada 100 segundos;
- MM250 = Cálculo da média móvel, variando a cada 250 segundos;
- MM500 = Cálculo da média móvel, variando a cada 500 segundos;
- MM1000 = Cálculo da média móvel, variando a cada 1000 segundos.

A Figura 49, a seguir, mostra um exemplo do comportamento do SGE para uma mesma operação, variando de acordo as estratégias, neste exemplo específico, com as estratégias DMS, MM500 e MM1000. Observa-se que quanto menor o intervalo da média móvel, maior parcela da demanda transiente será absorvida pelos motores, tornando o seu comportamento mais transiente. Isto se reflete no maior valor do CV calculado para as suas potências e, por consequência, a penalização do consumo. Na seção a seguir, os resultados para todas as simulações serão discutidos com mais detalhes. Os procedimentos de cálculo da potência e energia da bateria e dos motores, além dos respectivos consumos, foram os mesmos adotados na estratégia DMS já explicada neste trabalho.

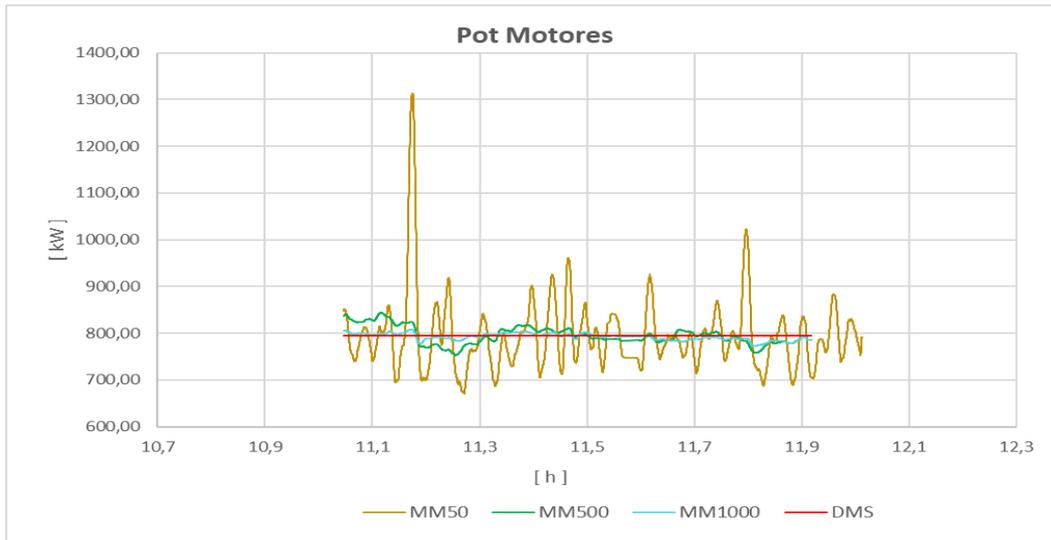


Figura 49: Exemplo da aplicação de diferentes estratégias para a utilização da hibridização.

Há que se destacar um procedimento específico a ser adotado para um tipo de operação do navio. Trata-se dos casos em que o navio está fundeado ou atracado. Nestes casos, considera-se que o navio será abastecido pela bateria durante a operação com algumas restrições. A bateria deve operar até no mínimo 20% do seu SOC por motivos de segurança e a partir daí, o SGE é acionado para recarregá-la até que a bateria retorne para a sua carga de 80%, desativando novamente o SGE e reestabelecendo o fornecimento de energia apenas pela bateria. Este tipo de operação é denominado de Start-Stop. Neste caso, portanto, não há a necessidade da manutenção de um motor em funcionamento durante o período de operação. A Figura 50 ilustra a variação do SOC da bateria, neste tipo de situação. Durante esta operação, o SGE é utilizado com apenas um motor em funcionamento e sempre no seu ponto ótimo de operação, ou seja, no ponto de menor SFC do motor.

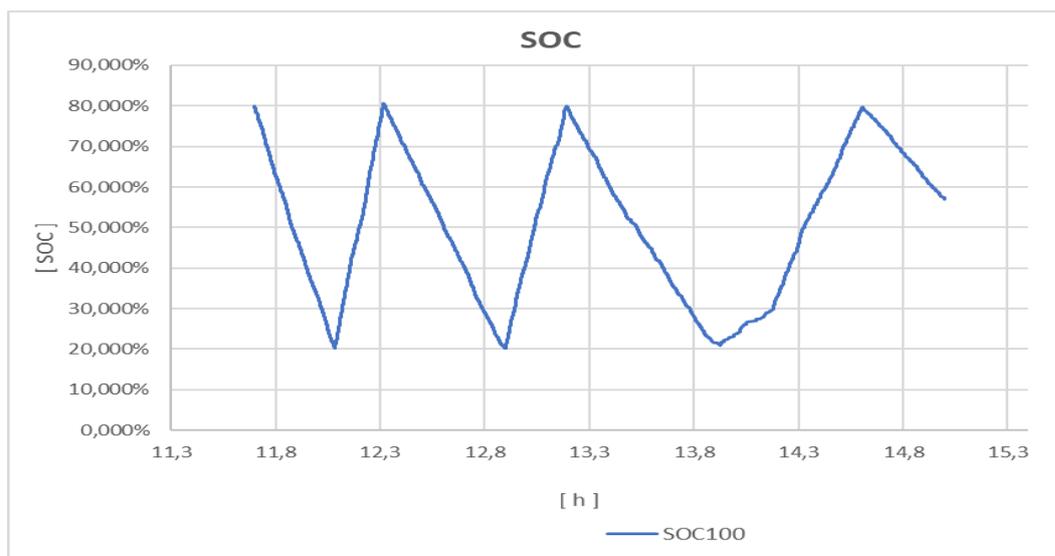


Figura 50: Variação do SOC da bateria na estratégia *Start-Stop*.

4.9

Análise das Simulações

Após todas as considerações e metodologias listadas até aqui, serão avaliados alguns cenários aplicados no simulador, buscando-se verificar o comportamento da hibridização nas diferentes operações realizadas pelo navio. Para isso são escolhidas as seguintes operações:

- Operação denominada ROV4YA, em que o navio está operando um equipamento ROV com 4 motores realizando DP, com barramento aberto;
- Operação denominada STD2YA, em que o navio está no aguardo, em alto mar, com 2 motores funcionando em DP e com o barramento aberto;
- Operação de Navegação NAVEG2NF, em que o navio está se deslocando em alto mar, com 2 motores funcionando com o barramento fechado, sem estar em DP;
- Operação de Navegação NAVEG2NA, em que o navio está se deslocando em alto mar, com 2 motores funcionando com o barramento aberto, sem estar em DP;
- Operação de PORTO, que engloba todo tipo de operação em que o navio não está navegando nem em DP, ou seja, o sistema de propulsão do navio não está sendo utilizado. Nela, há apenas a utilização de um motor para suprir a necessidade de carga do navio (PORTO). É importante observar que, para esta análise, apenas será considerada a estratégia que apresentou o melhor resultado relacionado com a redução do consumo.

Em uma análise posterior, será realizada uma avaliação das diferentes estratégias adotadas para a gestão do sistema de hibridização. Para esta análise, foram escolhidas as operações ROV4YA e STD2YA em que foram verificados os comportamentos do sistema hibridizado para as diferentes estratégias, sendo elas: DMS; MM50; MM100; MM250; MM500 e MM1000.

Por fim, como terceira e última análise, será realizado um estudo de caso, buscando-se avaliar a redução de consumo e de tempo de máquina atrelado ao uso do sistema híbrido com a bateria em um mês típico de operação do navio, baseado no levantamento das operações realizadas para o navio.

5

RESULTADOS

5.1

Resultado do Diagnóstico de operações do navio

Como primeira etapa da seção de resultados serão ilustrados os valores e gráficos encontrados para a pesquisa acerca dos diferentes tipos de operações da embarcação. A seguir, estão os resultados das análises feitas em cada mês no intervalo desde julho de 2020 a dezembro do mesmo ano, finalizando com os dados do período total analisado.

No mês de julho (Figura 51), 76,94% das operações foram realizadas com Posicionamento Dinâmico (DP), 19,22% foram operações NÃO DP, basicamente navegação, e em 3,84% do tempo, o navio passou parado, sendo FUNDEADO OU ATRACADO.

JULHO

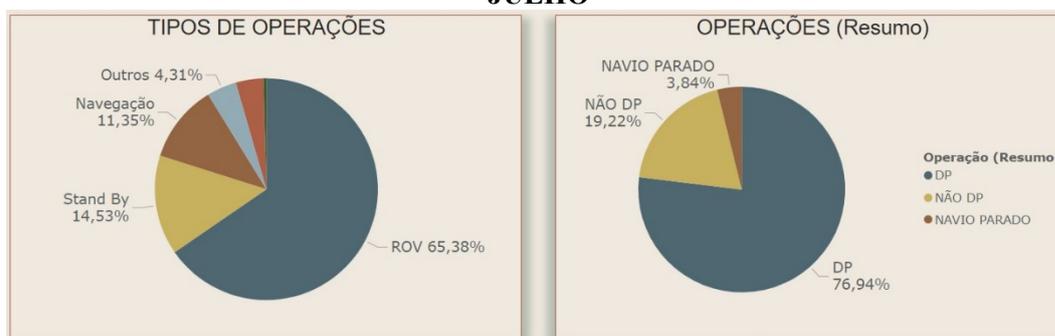


Figura 51: Dados de operações em julho.

No mês de agosto (Figura 52), 75,55% das operações foram realizadas com Posicionamento Dinâmico (DP), 13,37% foram operações NÃO DP e 11,08% do tempo o navio passou parado, sendo FUNDEADO OU ATRACADO.

AGOSTO

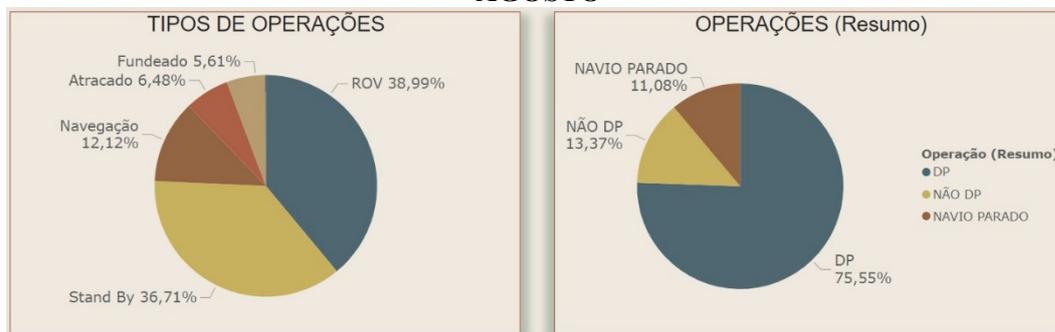


Figura 52: Dados de operações em agosto.

No mês de setembro (Figura 53), 47,43% das operações foram realizadas com Posicionamento Dinâmico (DP), 24,75% foram operações NÃO DP e 27,82% do tempo o navio passou parado, sendo FUNDEADO OU ATRACADO. Neste mês, houve uma variação no comportamento, observado, principalmente, no tempo que o navio passou atracado.

SETEMBRO:

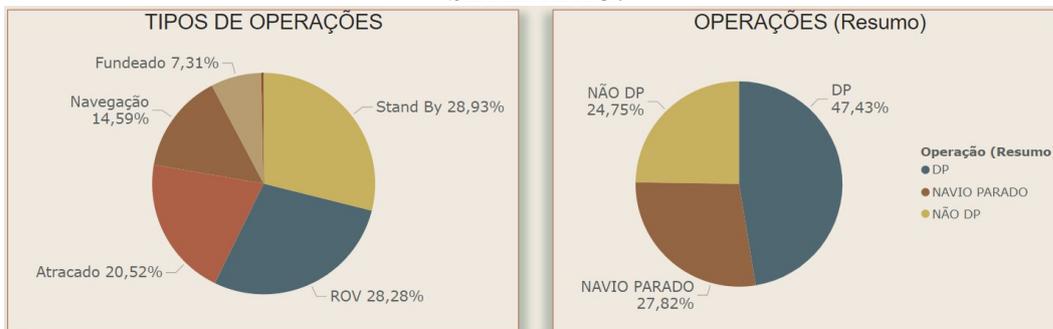


Figura 53: Dados de operações em setembro.

No mês de outubro (Figura 54), 75,71% das operações foram realizadas com Posicionamento Dinâmico (DP), 20,87% foram operações NÃO DP e 3,42% do tempo o navio passou parado, sendo FUNDEADO OU ATRACADO.

OUTUBRO:

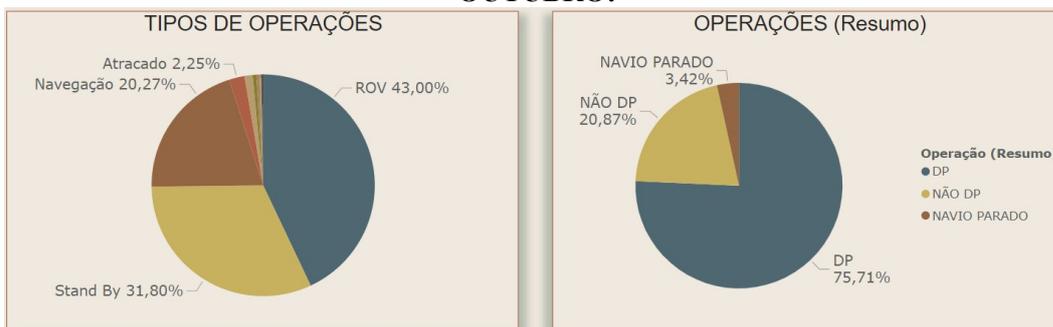


Figura 54: Dados de operações em outubro.

No mês de novembro (Figura 55), 72,84% das operações foram realizadas com Posicionamento Dinâmico (DP), 16,1% foram operações NÃO DP e 11,06% do tempo o navio passou parado, sendo FUNDEADO OU ATRACADO.

NOVEMBRO:

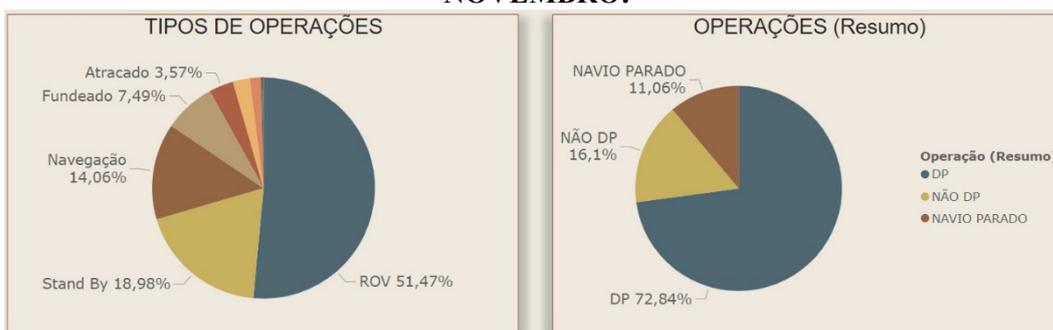


Figura 55: Dados de operações em novembro.

No mês de dezembro (Figura 56), 62,91% das operações foram realizadas com Posicionamento Dinâmico (DP), 27,92% foram operações NÃO DP e 9,17% do tempo o navio passou parado, sendo FUNDEADO OU ATRACADO.

DEZEMBRO:

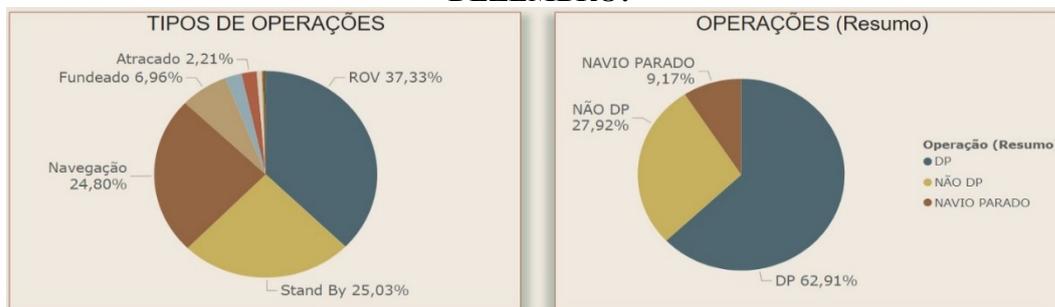


Figura 56: Dados de operações em dezembro.

Para os valores consolidados dos meses avaliados, desde julho até dezembro (Figura 57), 68,08% das operações foram realizadas com Posicionamento Dinâmico (DP), 20,47% foram operações NÃO DP e 11,45% do tempo o navio passou parado, sendo FUNDEADO OU ATRACADO.

CONSOLIDADO DOS MESES:

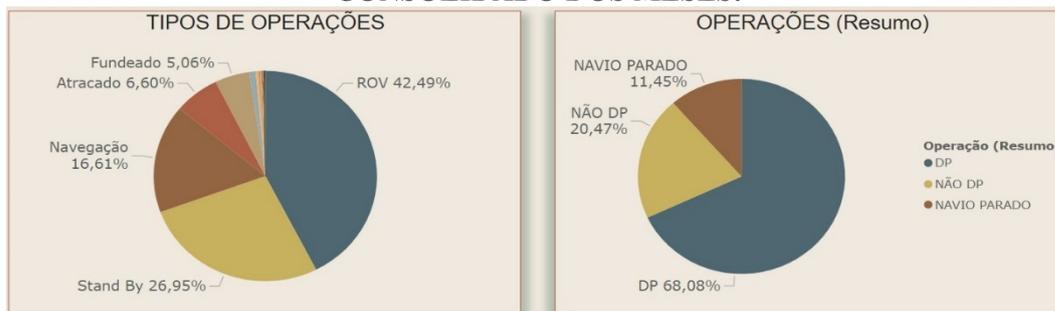


Figura 57: Dados de operações acumulado de julho a dezembro.

Estes resultados mostram que, em sua grande maioria, o navio opera em Posicionamento Dinâmico e que a porcentagem deste tipo de operação, cerca de 70%, se repete ao longo dos meses, com exceção do mês de setembro em que o navio esteve, por um período atípico, atracado.

5.2

Identificação dos dias para tratamento dos dados do navio

Com o levantamento feito das operações da embarcação, identificou-se os seguintes perfis de operação, com as suas diferentes características, como pode ser observado na Tabela 4. Nela é possível verificar a operação, número de motores ativo em cada operação, a situação quanto ao DP (se está ou não realizando posicionamento dinâmico), se o barramento está aberto ou fechado e o código relacionado com esta operação.

Tabela 4: Operações realizadas pelo navio.

OPERAÇÃO	N° MOTORES	DP	BARRAMENTO	CÓDIGO
PORTO	1	NÃO	FECHADO	PORTO 1NF
FUNDEADO	1	NÃO	FECHADO	FUND 1NF
FUNDEADO	2	NÃO	FECHADO	FUND 2NF
NAVEGANDO	2	NÃO	ABERTO	NAVEG 2NA
NAVEGANDO	2	NÃO	FECHADO	NAVEG 2NF
STAND BY	2	SIM	ABERTO	STD 2YA
STAND BY	2	SIM	FECHADO	STD 2YF
ROV	4	SIM	ABERTO	ROV 4YA

Devido à grande complexidade do levantamento e processamento dos dados, teve-se que escolher, para posterior tratamento, apenas alguns dias, de todos os analisados, assegurando que contivessem amostras representativas destas operações, uma vez que se mostrou inviável tratar completamente os dados disponíveis para todo o período em que houve a aquisição na embarcação. Foi garantido que todos os tipos de operação citados na Tabela 4 estariam contidos nestes dias, tendo sido adquiridos em um intervalo de tempo relevante para as análises, sendo possível desta forma, coletar e tratar os dados do sistema de geração de energia de forma otimizada.

Os dias selecionados foram:

- 25/JUL/2020;
- 04/AGO/2020;
- 05/AGO/2020;
- 10/AGO/2020;
- 13/AGO/2020;
- 26/AGO/2020.

A Figura 58 mostra o painel de operação diária do navio, filtrado para os dias citados anteriormente, contendo todas as operações que ocorreram. Já na Figura 59, podemos observar todas as operações levantadas para os dias selecionados. É importante ressaltar que, para cada dia analisado, os dados foram levantados durante as 24h de operação, independente se o navio estava realizando alguma tarefa em alto mar ou se estava parado no porto.

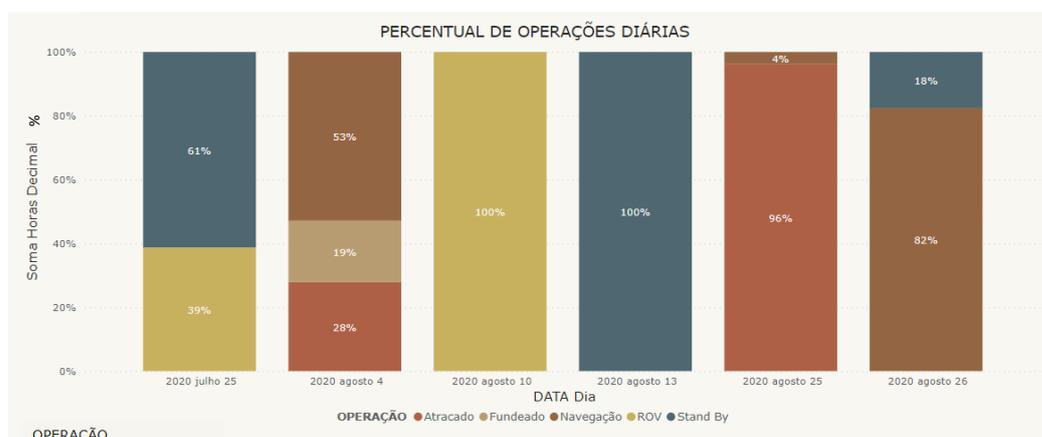


Figura 58: Perfil diário de operação dos dias selecionados para análise.

Além das operações que o navio realiza, alguns dados referentes à potência e consumo são necessários para a correta identificação do perfil de operação, como será visto mais adiante. Em adição, observa-se que para alimentar o simulador do navio com um número maior de parâmetros, é recomendado que se obtenha vários intervalos de operação. Nas operações descritas na Figura 59, percebe-se que as operações foram subdivididas em intervalos menores. Como exemplo, tem-se a operação **ROVS4Aberto** realizada no dia 25/JUL. Esta teve duração de 4 horas, iniciando às 16h e finalizando às 20h do mesmo dia. Neste caso, ter-se-ia uma média dos dados referente à essas 4 horas e um valor de CV também para todo este intervalo. Como pretende-se que este valor seja usado como referência para o simulador, é interessante ter um maior número de valores de média, desvio padrão e CV. Por isso, toma-se como premissa que estes tipos de operação devem ser subdivididas, ou seja, ao invés de se ter um exemplo de operação com 4 horas e com apenas um valor médio, um valor de desvio padrão, um CV etc., passa-se a ter 4 operações **ROVS4Aberto** com duração de 1 hora cada, e para estas operações são calculados 4 valores de médias, 4 valores de desvio padrão e 4 CVs. Isto aumenta a variedade de exemplos de cada operação. Para outras operações com durações menores, também foi adotado o mesmo procedimento, gerando intervalos que variaram em valores próximos a 30 minutos. Em outros casos em que a operação teve duração maior, como no caso do dia 13 de agosto com a operação **StandbyS2aberto** durando 11 horas e 40 minutos, foi viável subdividir esta operação em um intervalo de 4 horas. Estes intervalos podem ser verificados na Figura 59:

Dia	DP	Operação	Início	Fim	Duração
25/jul	Y	Stand ByS2Fechado	11:00:00	12:00:00	01:00:00
25/jul	Y	Stand ByS2Fechado	12:00:00	12:53:00	00:53:00
25/jul	Y	ROVS4Aberto	16:00:00	17:00:00	01:00:00
25/jul	Y	ROVS4Aberto	17:00:00	18:00:00	01:00:00
25/jul	Y	ROVS4Aberto	18:00:00	19:00:00	01:00:00
25/jul	Y	ROVS4Aberto	19:00:00	20:00:00	01:00:00
04/ago	N	NavegaçãoN2Fechado	00:00:00	02:30:00	02:30:00
04/ago	N	NavegaçãoN2Fechado	02:30:00	04:41:00	02:11:00
04/ago	N	NavegaçãoN2Fechado	04:43:00	06:30:00	01:47:00
04/ago	N	FundeadonN1Fechado	21:00:00	22:00:00	01:00:00
04/ago	N	FundeadonN1Fechado	22:00:00	23:00:00	01:00:00
04/ago	N	FundeadonN1Fechado	23:00:00	23:59:00	00:59:00
04/ago	N	PortoN1Fechado	12:00:00	13:00:00	01:00:00
04/ago	N	PortoN1Fechado	13:00:00	14:00:00	01:00:00
04/ago	N	PortoN1Fechado	14:00:00	15:00:00	01:00:00
04/ago	N	PortoN1Fechado	17:00:00	18:25:00	01:25:00
05/ago	N	FundeadonN2Fechado	18:05:00	18:45:00	00:40:00
05/ago	N	FundeadonN2Fechado	19:08:00	20:01:00	00:53:00
05/ago	N	NavegaçãoN2Fechado	20:00:00	21:30:00	01:30:00
05/ago	N	NavegaçãoN2Fechado	21:30:00	23:50:00	02:20:00
10/ago	Y	ROVS4Aberto	00:00:00	00:38:00	00:38:00
10/ago	Y	ROVS4Aberto	00:48:00	02:00:00	01:12:00
10/ago	Y	ROVS4Aberto	02:00:00	02:59:00	00:59:00
13/ago	Y	Stand ByS2Aberto	00:00:00	04:00:00	04:00:00
13/ago	Y	Stand ByS2Aberto	04:00:00	08:00:00	04:00:00
13/ago	Y	Stand ByS2Aberto	08:00:00	10:00:00	02:00:00
13/ago	Y	Stand ByS2Aberto	10:00:00	11:40:00	01:40:00
25/ago	N	PortoN1Fechado	09:48:00	13:00:00	03:12:00
25/ago	N	PortoN1Fechado	15:50:00	18:16:00	02:26:00
26/ago	N	NavegaçãoN2Aberto	09:41:00	10:34:00	00:53:00
26/ago	N	NavegaçãoN2Aberto	10:43:00	13:00:00	02:17:00
26/ago	N	NavegaçãoN2Aberto	13:00:00	14:30:00	01:30:00
26/ago	N	NavegaçãoN2Aberto	14:30:00	16:25:00	01:55:00
26/ago	Y	Stand ByS2Aberto	16:48:00	18:00:00	01:12:00
26/ago	Y	Stand ByS2Aberto	18:00:00	19:45:00	01:45:00
26/ago	Y	Stand ByS2Aberto	19:45:00	23:59:00	04:14:00

Figura 59: Lista dos dias analisados com as respectivas operações.

5.3

Definição dos parâmetros de fábrica dos motores

Para comparar os valores reais de consumo em cada faixa de potência, adquiridos pelo navio com os valores de projeto, fez-se necessário obter, através de regressão dos dados contidos na Tabela 1, a relação entre taxa de consumo ou *Fuel Consumption* (FC) e consumo específico (SFC) em função dos valores de potência, englobando toda a faixa de operação dos motores. Para isso, baseado nos dados da Tabela 1, foram calculadas as duas equações a seguir, sendo a eq. (17) para o FC e a eq. (18) para o SFC. Os gráficos da Figura 60 e Figura 61 foram construídos com base nestas equações e representam, respectivamente, a relação FC x Potência e SFC x Potência:

$$\begin{aligned}
 FC &= 1,74895 * 10^{-13} * POT^5 - 7,75204 * 10^{-10} * POT^4 \\
 &+ 1,21077 * 10^{-6} * POT^3 - 7,75700 * 10^{-4} * POT^2 \\
 &+ 4,09487E * 10^{-1} * POT + 2,15199 * 10^1
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$SFC = \frac{1}{(4,1069 - 306,67 * 1/POT)}
 \tag{18}$$

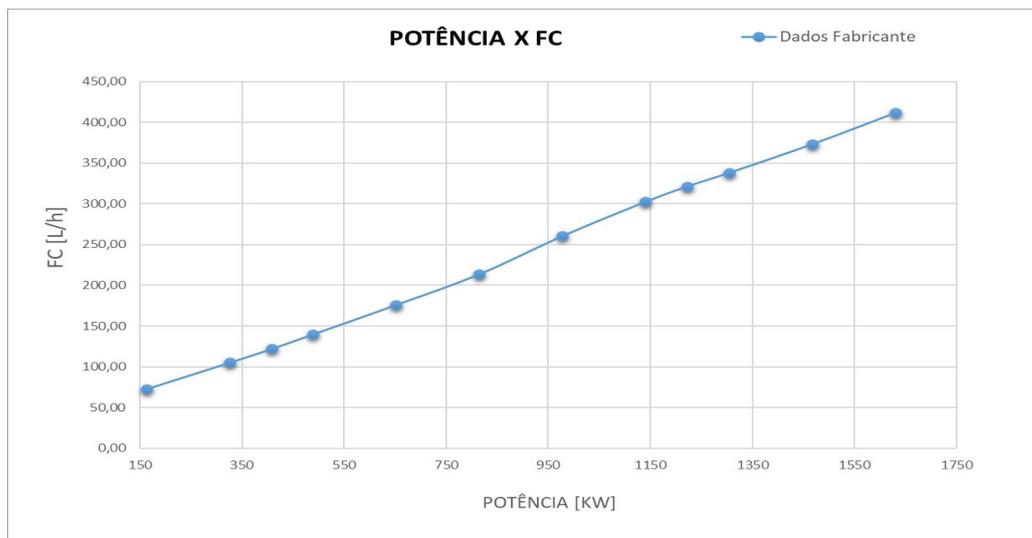


Figura 60: Curva Potência x FC através de dados do fabricante. $R^2 = 0,99$

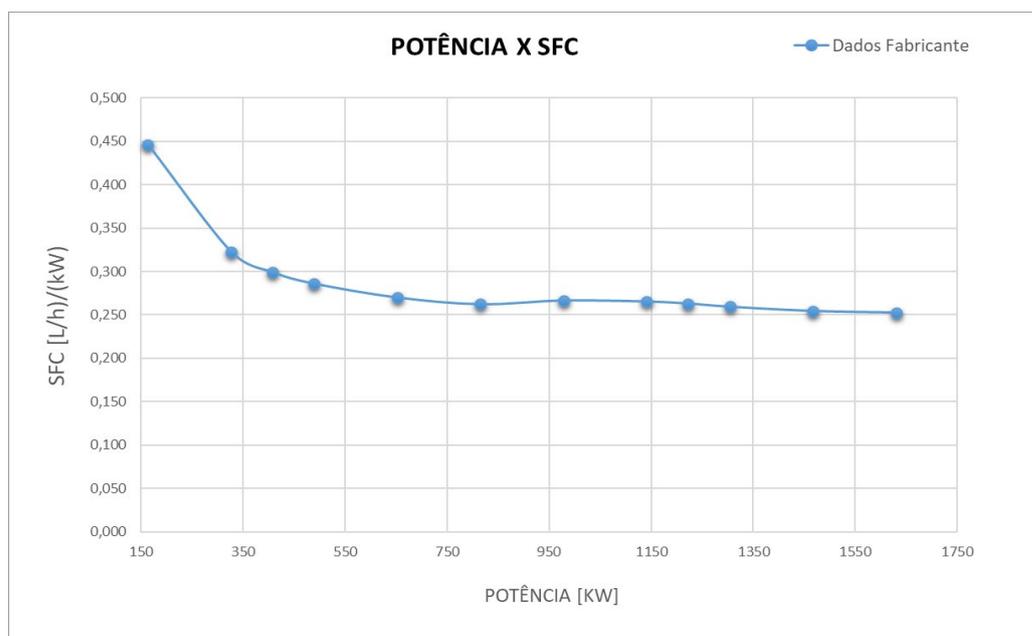


Figura 61: Curva Potência x SFC através de dados do fabricante. $R^2 = 0,99$

Assim como na Tabela 1, o gráfico da Figura 60 evidencia que há uma relação inversa entre potência e consumo específico, ou seja, quanto menor a potência, maior o consumo específico, levando o motor a uma operação menos eficiente. No entanto, pode-se também observar que a partir dos valores de potência em torno de 50 % da carga nominal, (815 kW) há uma tendência de estabilização do SFC, não havendo variações expressivas na eficiência do motor a partir deste valor de carga.

5.4

Diagnóstico do sistema de geração de energia

Após encontrar a relação entre consumo e potência nas condições ideais, buscou-se a relação do Coeficiente de Variação (CV) com os diferentes tipos de operações, conforme procedimento visto no tópico 4.5. Para isto, foram escolhidos alguns intervalos de dados contendo cada, uma operação como visto na Tabela 5. Pelos valores obtidos de CV, percebe-se que as operações de navegação e fundeada ou porto são muito menos transientes do que as operações que ocorrem com posicionamento dinâmico (DP). Isto pode ser explicado pela necessidade constante de alteração de potência do SGE para manter o navio parado, em contraposição às cargas externas que tendem, de forma aleatória, a tirá-lo da sua posição quando o navio está em DP.

Tabela 5: Operações do NAVIO. Classificação de acordo com o CV.

Dia	DP	Operação	Duração (H)	Potência KW	CV%
05/ago	N	NAVEG 2NF	2:30	1564,38	1,37
26/ago	N	NAVEG 2NA	5:00	1687,26	1,64
04/ago	N	NAVEG 2NF	4:30	953,32	2,99
05/ago	N	FUND 1NF	5:37	219,66	4,33
26/ago	Y	STD 2YA	4:12	757,24	6,90
25/jul	Y	ROV 4YA	4:30	910,96	14,38

Para ilustrar a diferença de comportamento nestes tipos de operações, algumas operações contidas na Tabela 5 serão avaliadas a seguir:

Inicialmente, são mostrados os valores para a operação em que se tem a embarcação navegando com apenas 2 geradores acionados, neste caso, os motores G1 e G3. O gráfico da Figura 62 mostra a variação de potência dos geradores 1 e 3 em azul e laranja, respectivamente. Em rosa, encontra-se a variação do somatório das potências nos dois geradores. Já a Figura 63 mostra os valores de SFC para os mesmos geradores. Nos dados da Tabela 6, pode-se verificar os valores da potência média da operação, o seu SFC, além do CV calculado, que neste caso foi de 1,37% correspondendo a uma operação estacionária, de acordo com o critério estabelecido neste relatório.

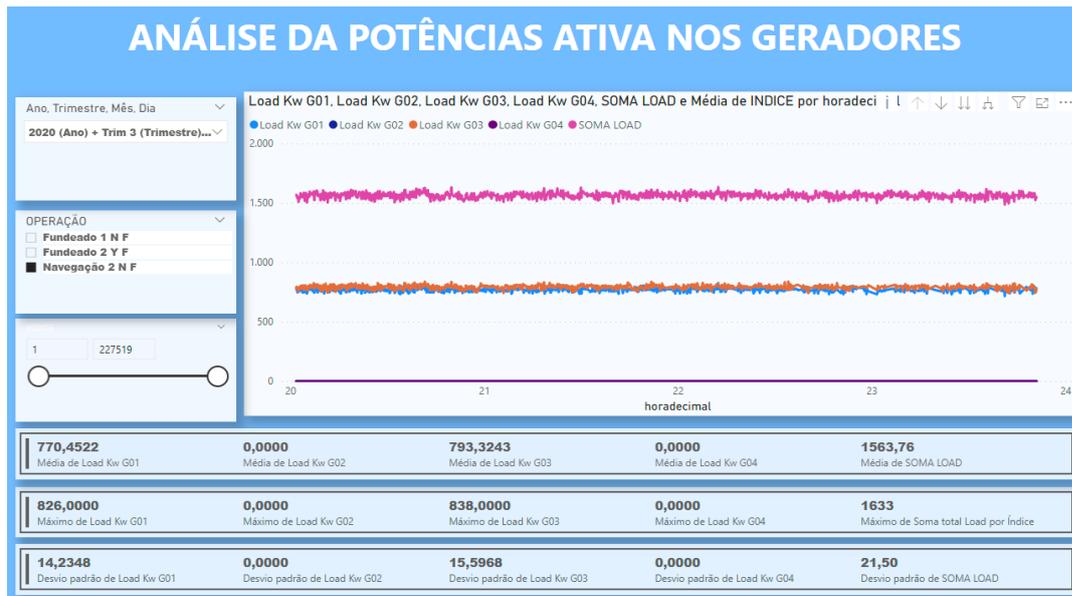


Figura 62: Variação de Potência para a operação NAVEGAÇÃO 2NF do dia 05/08/2020.

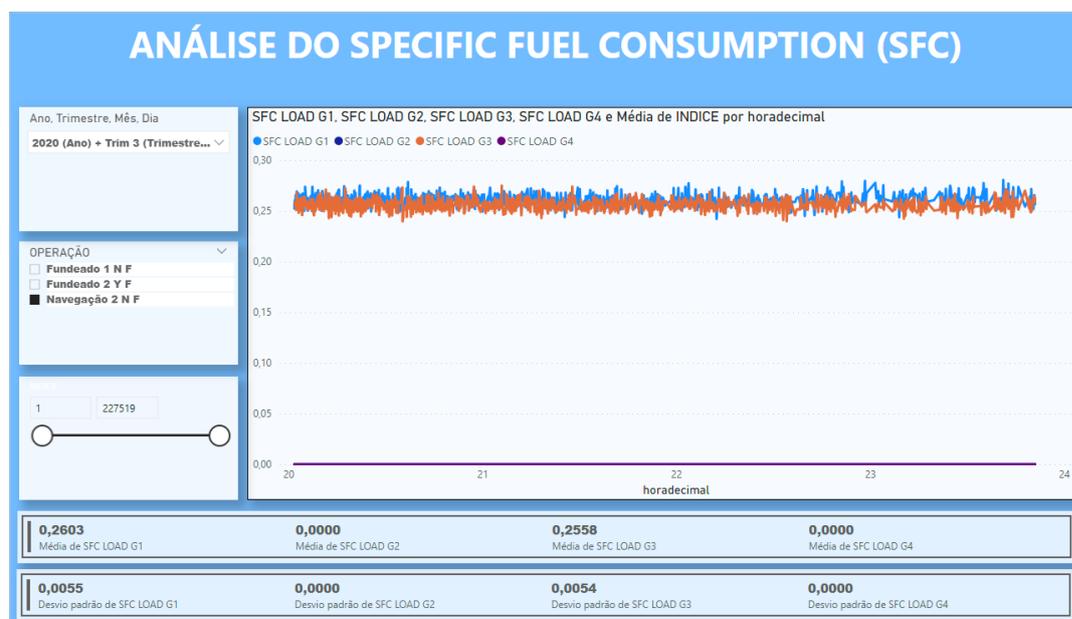


Figura 63: Variação SFC para a operação NAVEGAÇÃO 2NF do dia 05/08/2020.

Tabela 6: Dados dos geradores para a operação NAVEGAÇÃO 2NF do dia 05/08/2020.

Dia	DP	Operação	Duração	POTÊNCIA KW	CV%	SFC (L/h)/(kW)
05/ago	N	NAVEG 2NF	2:30	1564,380	1,37	0,258
G1				770,614		0,260
G2						
G3				793,799		0,256
G4						

A segunda operação avaliada refere-se ao navio fundeado, operando apenas com o gerador G3. Nos gráficos da Figura 64, para potência, e Figura 65, para SFC, observa-se o

comportamento deste motor no período analisado. Na Tabela 7, tem-se o valor da potência média para o G3 de 219,656 kW, correspondente à 13% da carga nominal. Neste caso, apesar do coeficiente de variação ser baixo (4,33%), observa-se um SFC elevado, chegando a um valor médio de 0,402[(L/h)/kW]. Este valor está condizente com faixa de operação do gerador G3, muito abaixo dos 50% em relação à carga nominal, ou seja, pela baixa demanda de carga do navio, nesta operação, o motor teve que operar muito abaixo da sua faixa otimizada de operação.

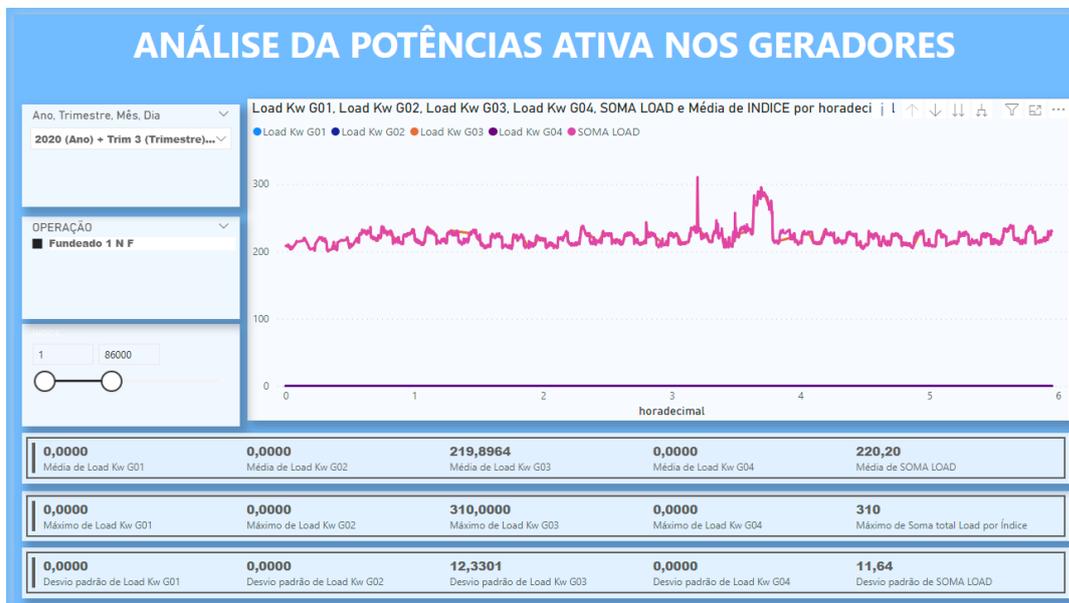


Figura 64: Variação de Potência para a operação FUNDEADO 1NF do dia 05/08/2020.

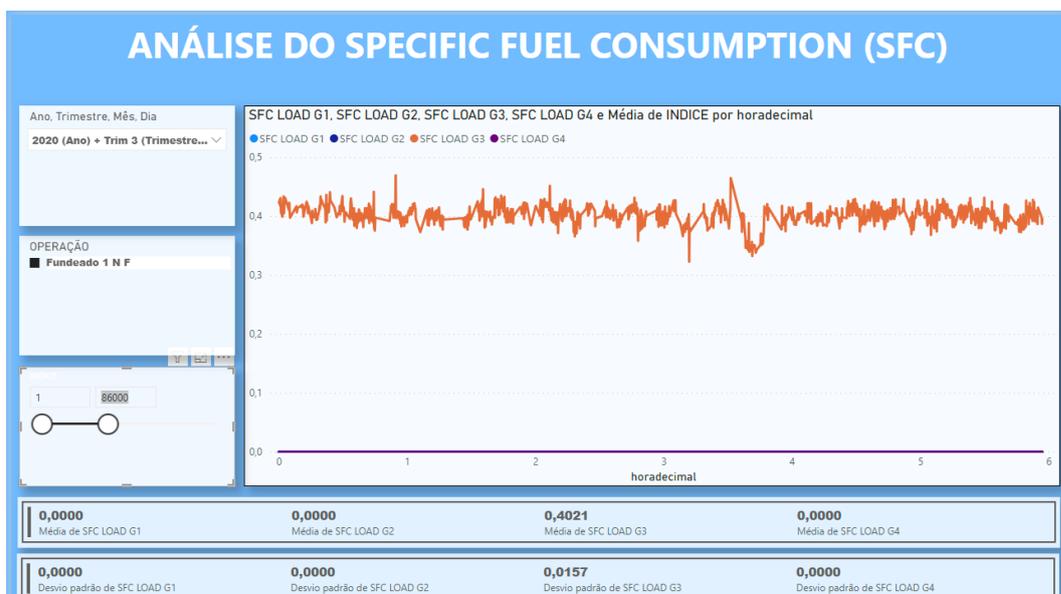


Figura 65: Variação de SFC para a operação FUNDEADO 1NF do dia 05/08/2020.

Tabela 7: Dados dos geradores para a operação FUNDEADO 1NF do dia 05/08/2020.

Dia	DP	Operação	Duração	POTÊNCIA KW	CV%	SFC (L/h)/(kW)
05/ago	N	FUND 1NF	5:37	219,656	4,33	0,402
G1						
G2						
G3				219,656		0,402
G4						

A terceira operação é relativa ao posicionamento dinâmico do navio, enquanto ele está aguardando condições de mar para entrar em operação ou em *Stand By*. No caso estudado, o navio está operando com os geradores G1, em azul, e G3, em laranja, como pode ser visto nos gráficos para potência, na Figura 66, e para o SFC, na Figura 67.

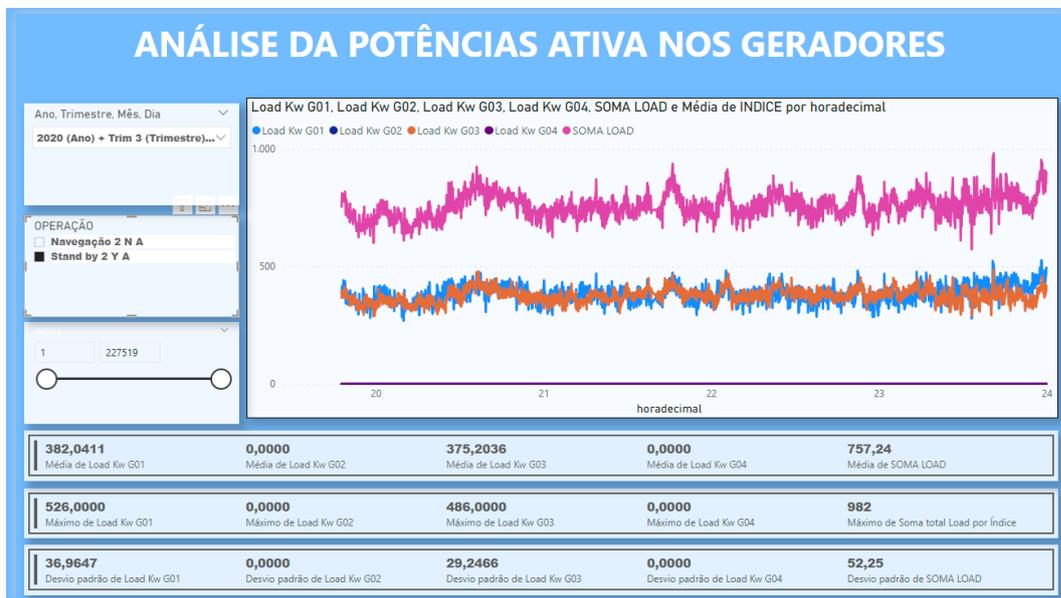


Figura 66: Variação de Potência para a operação STAND BY 2YA do dia 26/08/2020.

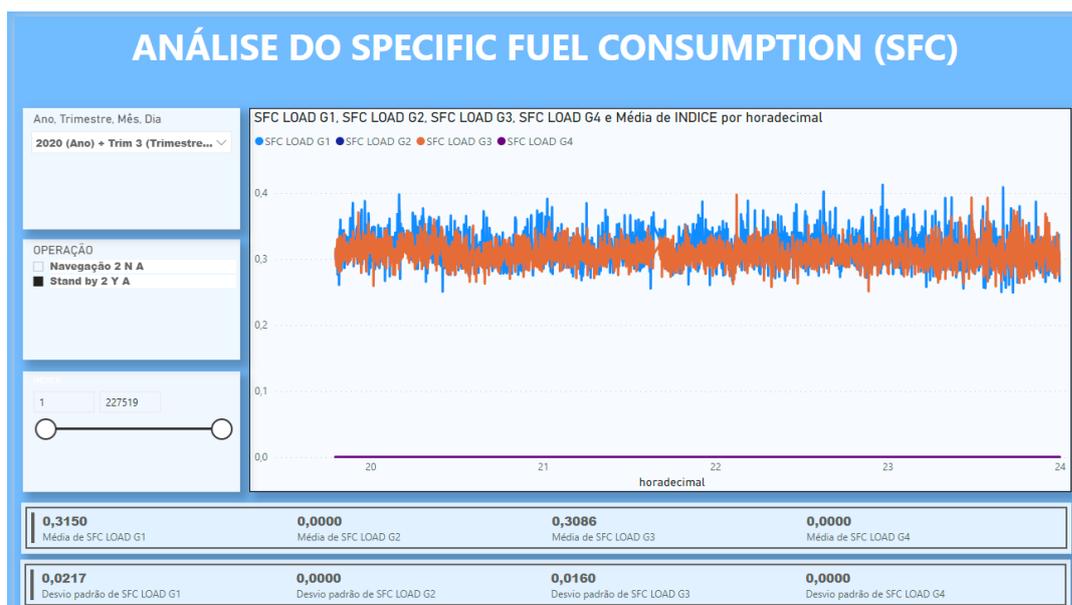


Figura 67: Variação de SFC para a operação STAND BY 2YA do dia 26/08/2020.

Pela Tabela 8, observam-se os valores das potências para os dois geradores e a potência acumulada, assim como os valores de SFC. Além disso, pode-se observar o valor do CV de 6,90%, já podendo, portanto, classificar esta operação como pouco transiente, de acordo com os critérios estabelecidos no tópico 4.5. Nota-se que os valores de potência em ambos os geradores estão próximos a 23% da faixa nominal, levando esta operação para uma faixa de menor eficiência, como pode ser observado pelos dados do fabricante do motor constantes na Tabela 1. Isto se reflete no valor de SFC em torno de 0,312 [(L/h)/kW], cerca de 16% acima do SFC para 50% da carga nominal, faixa de maior eficiência.

Tabela 8: Dados dos geradores para a operação STAND BY 2YA do dia 26/08/2020.

Dia	DP	Operação	Duração	POTÊNCIA KW	CV%	SFC (L/h)/(kW)
26/ago	Y	STD 2YA	4:12	757,240	6,90	0,312
G1				382,041		0,315
G2						
G3				375,204		0,309
G4						

A quarta e última operação avaliada é a denominada ROV, que ocorre com posicionamento dinâmico da embarcação para a utilização de um Veículo Remotamente Operado (*Remotely Operated Vehicle-ROV*) utilizando todos os 4 geradores, como pode ser observado nos gráficos de potência, na Figura 68, e SFC, na Figura 69. Para esta operação, nota-se uma alta variação dos valores de potência em torno de sua média, o que pode ser verificado tanto pelos gráficos já citados quanto pelo valor do CV de 14,38%, que se encontra na Tabela 9. Desta forma, pode-se classificar esta operação com transiente de acordo com a classificação citada no tópico 4.5 da Metodologia.

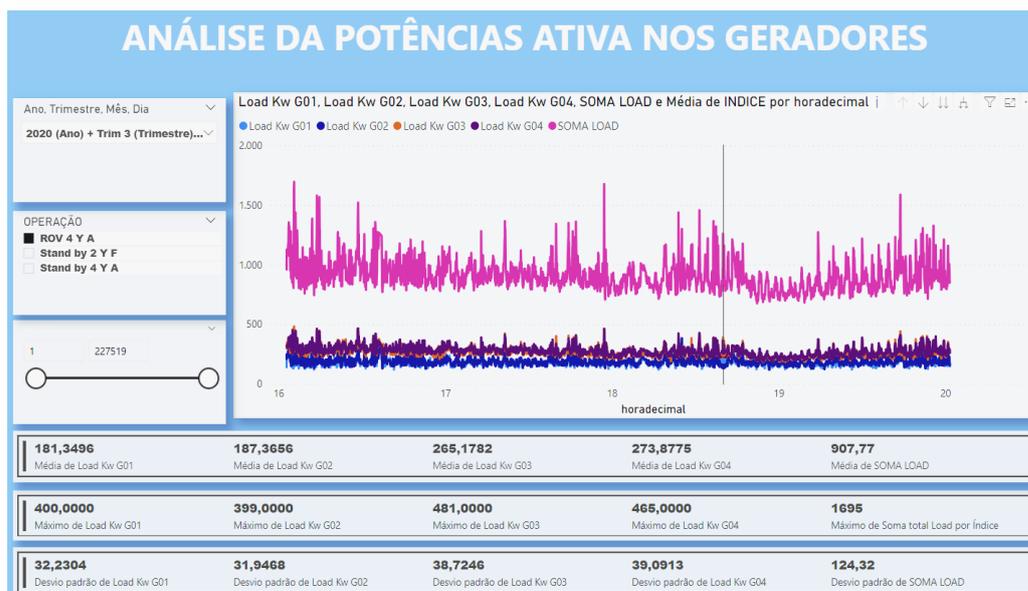


Figura 68: Variação de Potência para a operação ROV 4YA do dia 25/07/2020.

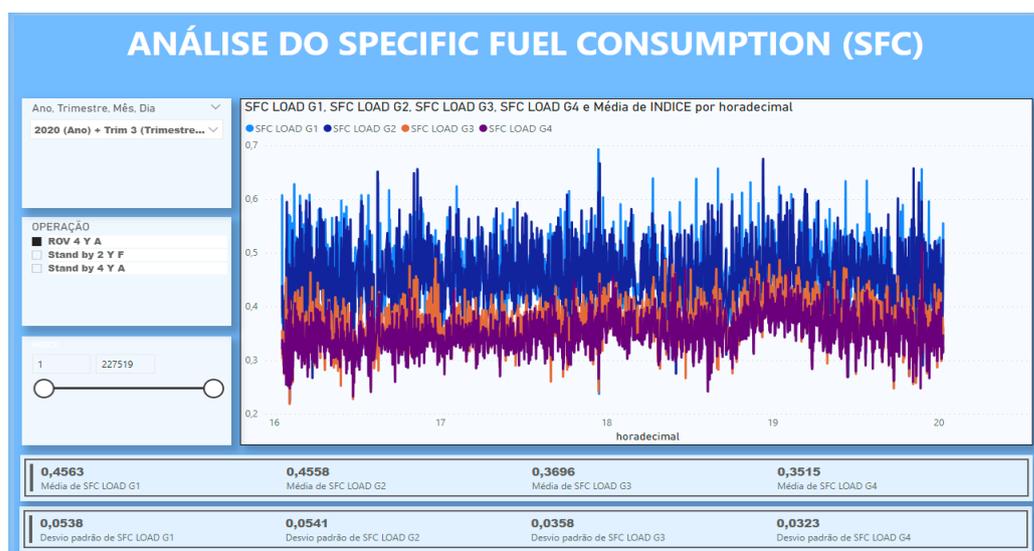


Figura 69: Variação de SFC para a operação ROV 4YA do dia 25/07/2020.

Tabela 9: Dados dos geradores para a operação ROV 4YA do dia 25/07/2020.

Dia	DP	Operação	Duração	POTÊNCIA KW	CV%	SFC (L/h)/(kW)
25/jul	Y	ROV 4YA	4:30	910,960	14,38	0,408
G1				182,596		0,455
G2				188,328		0,455
G3				265,822		0,369
G4				274,212		0,352

É importante salientar que, apesar da utilização dos 4 geradores, o valor médio da potência total solicitada na operação é apenas 910,96kW, sendo um pouco acima de 50% da carga nominal de um motor. O uso dos 4 motores, todos em faixas de operação baixas, ao invés da utilização de apenas um motor, se justifica aqui pela imposição de normas de segurança operacional quando o navio está em situações que demandam maior nível de

redundância, como no posicionamento dinâmico para a utilização de um ROV. Observa-se, neste caso, que os valores de SFC para cada um deles estão acima do esperado para as mesmas faixas de potência quando comparados aos dados do fabricante fornecidos na Tabela 1. Por exemplo, para o motor G1, a potência média encontrada é de 182,596 kW, ou seja, 11,27% da potência nominal. Pela Tabela 1, que contém os dados do fabricante do motor, percebe-se que o valor de SFC tende a crescer com o valor de potência nas faixas de potência entre 10% e 50%. Logo, para a operação do motor em 10% da potência, o valor do SFC deveria ser menor que o encontrado para 11,27%. No entanto, o valor médio de SFC encontrado na operação com 11,27% de potência é de 0,455 [(L/h)/kW], sendo este maior do que os 0,446[(L/h)/kW] referente à 10% da potência de operação de acordo com o fabricante do motor. Este valor acima do esperado pode ser explicado pelo alto grau transiente desta operação, levando a maiores perdas de eficiência em relação a uma operação estacionária. O mesmo comportamento ocorre nos outros 3 motores.

5.4.1

Cálculo da penalização dos motores

No tópico 4.6.2, foram descritos os procedimentos para o cálculo da penalização dos motores gerada pelo efeito do comportamento transiente devido às demandas de carga em cada tipo de operação realizada pela embarcação. Neste tópico, serão demonstrados os seus resultados.

Como já citado no tópico 4.6.2, foram analisados os dados de operação real do navio, separando-os pelo CV obtido em diferentes operações. Os CVs escolhidos foram:

- CV = 10,02%;
- CV = 8,8%;
- CV = 4,6%;
- CV = 2,87%.

A seguir, na Figura 70, estão dispostos os valores médios das diferenças entre o consumo de projeto e o real, além dos gráficos obtidos para a operação com CV = 10,02%. Observa-se também o valor mínimo e máximo das potências para o intervalo analisado.

CV	10,02%
Potência Mínima [kW]	302
Potência Máxima [kW]	512
DifCons médio	6,002%

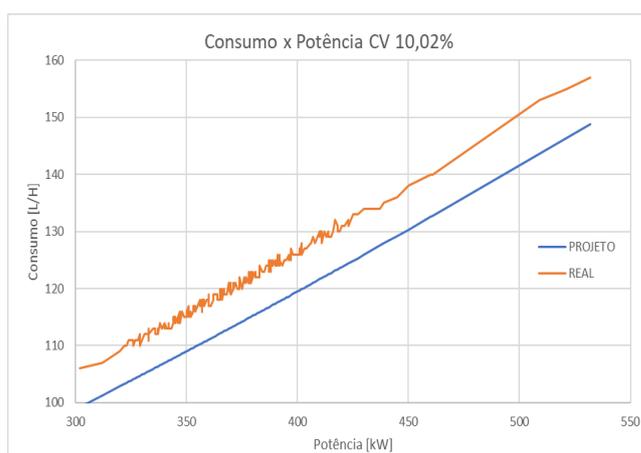


Figura 70:Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =10,02%.

Em seguida, na Figura 71, podem ser visualizados os valores médios das diferenças entre o consumo de projeto e o real, como também, os gráficos obtidos para a operação com CV =8,8% e seus valores mínimo e máximo de potência.

CV	8,80%
Potência Mínima [kW]	292
Potência Máxima [kW]	588
DifCons médio	5,078%

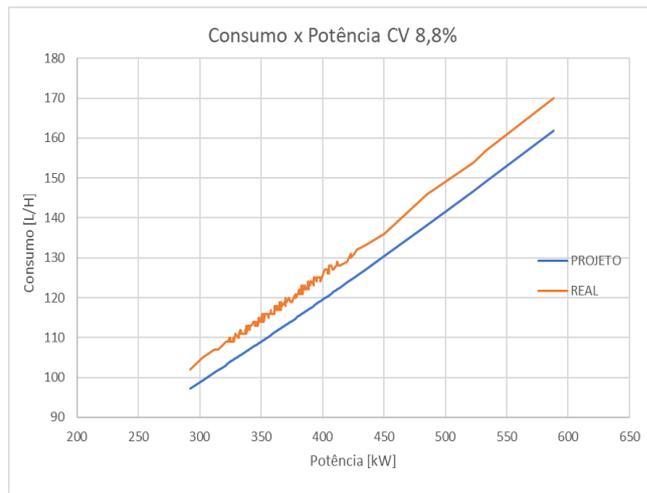


Figura 71: Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =8,80%.

Adiante, na Figura 72, pode-se observar os valores médios das diferenças entre o consumo de projeto e o real, além dos gráficos obtidos para a operação com CV =4,60% e seus valores mínimo e máximo de potência.

CV	4,60%
Potência Mínima [kW]	202
Potência Máxima [kW]	264
DifCons médio	1,83%

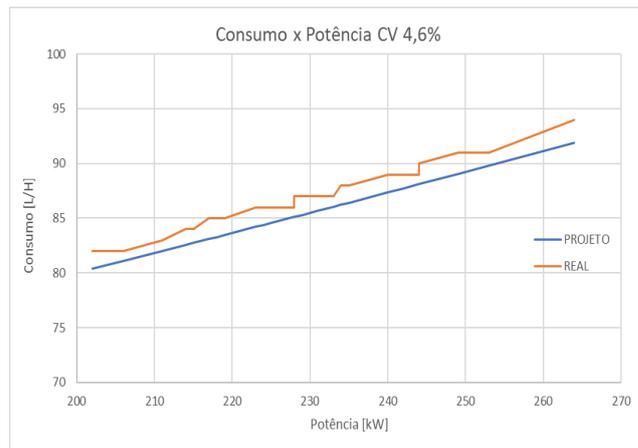


Figura 72: Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =4,60%.

A seguir, na Figura 73, estão dispostos os valores médios das diferenças entre o consumo de projeto e o real, além dos gráficos obtidos para a operação com CV =2,87%, também com os valores mínimo e máximo de potência.

CV	2,87%
Potência Mínima [kW]	818
Potência Máxima [kW]	854
DifCons médio	0,76%

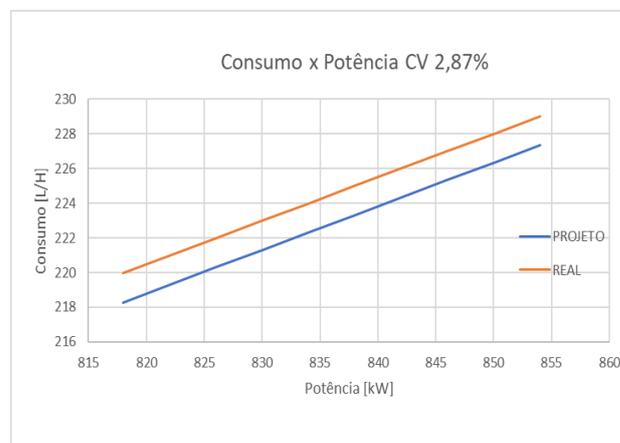


Figura 73: Diferença entre consumo real e de fábrica para CV =2,87%.

Após levantar os valores anteriores, foi confeccionada uma curva relacionando a diferença de consumo com o CV da operação. Os resultados da diferença de consumo para cada valor de CV analisado, juntamente com a equação obtida por regressão linear, estão dispostos a seguir na Figura 74.

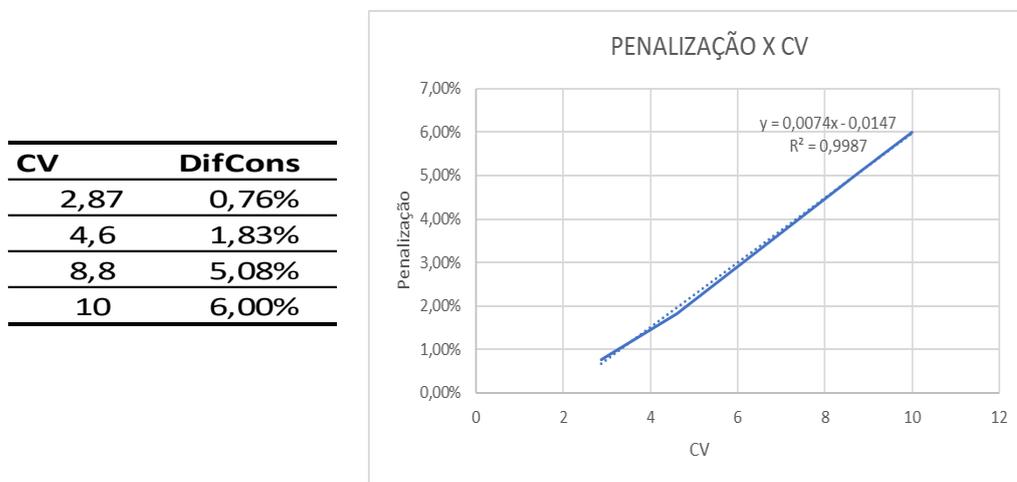


Figura 74: Dados relacionado o CV com a diferença de consumo real e de fábrica.

Observa-se na Figura 74, que há uma tendência próxima a linear na curva encontrada. Desta maneira, foi criada uma tabela para a penalização do consumo nas operações do navio de acordo com sua faixa de transiência, refletida pelos valores do CV. A Tabela 10 contém faixa de intervalo de CV e o valor do consumo penalizado para cada um deles. Por exemplo, na faixa de CV entre 3,1% e 4%, o consumo será de 101,5% em relação ao de fábrica para um mesmo valor de potência. Logo deve ser utilizada a eq. (17) para calcular o consumo e aplicar ao valor um acréscimo de 1,5%.

Tabela 10: Relação entre CV e penalização de consumo.

Intervalos (CV)	Consumo Penalizado
0% a 2%	100,00%
2,1% a 3%	100,75%
3,1% a 4%	101,50%
4,1% a 5%	102,25%
5,1% a 6%	103,00%
6,1% a 7%	103,75%
7,1% a 8%	104,50%
8,1% a 9%	105,25%
>9%	106,00%

5.4.2

Cálculo da Carga Térmica

Neste tópico será mostrado o resultado para o cálculo da carga térmica de penetração no container devido aos efeitos ambientais aos quais ele é submetido, cujos procedimentos foram mostrados no tópico 4.6.3.

Para o container idealizado para o estudo de caso, conforme visto na Figura 44, os valores de x_1 e k_1 equivalem à estrutura de aço, que, como é visto na indicação da Tabela 2, possui camada dupla, daí sua repetição na fórmula. Já os valores de x_2 e k_2 equivalerão aos indicados na Tabela 2 para o Poliuretano.

Como dados de entrada do simulador, também deve-se determinar as temperaturas internas do container e a temperatura média externa do ambiente ao qual ele vai operar. Para este estudo, foram considerados os seguintes valores:

- Temperatura interna do ar de 20°C ou 293K, que, de acordo com Miguel [40], é uma temperatura em que baterias de Lítio operam com boa eficiência.
- Temperatura externa do ar de 27°C ou 300K, sendo a temperatura média anual de uma região da costa da região sudeste brasileira.

Conforme disposição da Figura 44, foram calculados os coeficientes globais de transferência de calor através da eq. (9) e, posteriormente, utilizando os valores de área de cada parede do container e os incrementos de temperatura dados pela Tabela 3, obteve-se as cargas térmicas para cada uma das paredes do container.

Como a espessura da parede é a mesma em todos os lados, o coeficiente global U tem valor único em todo o container, sendo ele igual a:

$$U = 0,336 \text{ [W/m}^2\text{.K]}.$$

Para todos os lados do container identificados pela Figura 44, temos então:

TETO:

$$CT_{\text{teto}} = 91,849 \text{ W}$$

FRENTE:

$$CT_{\text{frente}} = 27,071 \text{ W}$$

PISO:

$$CT_{\text{piso}} = 27,071 \text{ W}$$

LADO DIREITO (LD):

$$CT_{\text{LD}} = 67,678 \text{ W}$$

LADO ESQUERDO (LE):

$$CT_{\text{LE}} = 67,678 \text{ W}$$

E, finalmente, somando-se todos os valores anteriores do calor transmitido por cada parede, tem-se o valor global a seguir:

CALOR TRANSMITIDO TOTAL [W]:

$$CT = 344,193 \text{ W}$$

5.5

Análise das diferentes operações

Após a confecção do simulador para o sistema de hibridização do navio, e depois da obtenção dos dados referentes às diferentes operações da embarcação estudada, foi possível realizar algumas simulações com os principais tipos de operações realizadas. A seguir, tem-se os seus resultados e análises.

5.5.1

ROV4YA. Operação com duração de 4 horas e uso da estratégia DMS

Contextualizando esta primeira análise, foi realizada uma coleta de dados de uma operação com aproximadamente 4 horas de duração, em que o navio operou em DP com 4

motores em funcionamento e com seu barramento aberto. Esta operação é identificada como ROV4YA. Para esta primeira análise, serão vistos os resultados obtidos apenas com a melhor estratégia adotada, que, neste caso, foi a DMS. Na simulação com o uso da hibridização, foi escolhida a opção de uso de apenas um motor em conjunto com o banco de baterias. O primeiro gráfico da Figura 75 mostra a relação entre a potência total do SGE durante todo o período coletado na operação real, sem a hibridização, (em verde) e para a simulação com a hibridização (em azul). A primeira observação a ser feita refere-se à diferença entre os dois comportamentos quanto a sua transiência. No primeiro caso, observa-se uma operação com bastante variação de carga, com o CV da operação sendo de 13,7%. Já na operação com a hibridização em DMS, por definição, o seu CV é nulo (motor operando com carga estacionária). Além disso, com a utilização de apenas um motor, o funcionamento fica muito próxima das condições ótimas de operação, de acordo com os dados de projeto já apresentados neste trabalho pela Tabela 1. O gráfico da Figura 76 também evidencia a diferença de comportamento entre a operação real e a simulada, mas agora, com enfoque no consumo específico de combustível ou SFC. Claramente, pela figura, observa-se a diferença entre os consumos específicos nas duas operações. Foram obtidos os SFCs médios das duas operações, sendo de 0,41 (L/h)/kW para a operação real e 0,27(L/h)/kW para o sistema hibridizado. Uma redução de 34,1%, o que representa ganho relevante de eficiência no consumo. Esta diferença é explicada pela variação do CV nas suas situações, ou seja, o motor operando de forma estável, com CV nulo, tem maior eficiência do que operando de forma transiente com o CV de 13,7%.

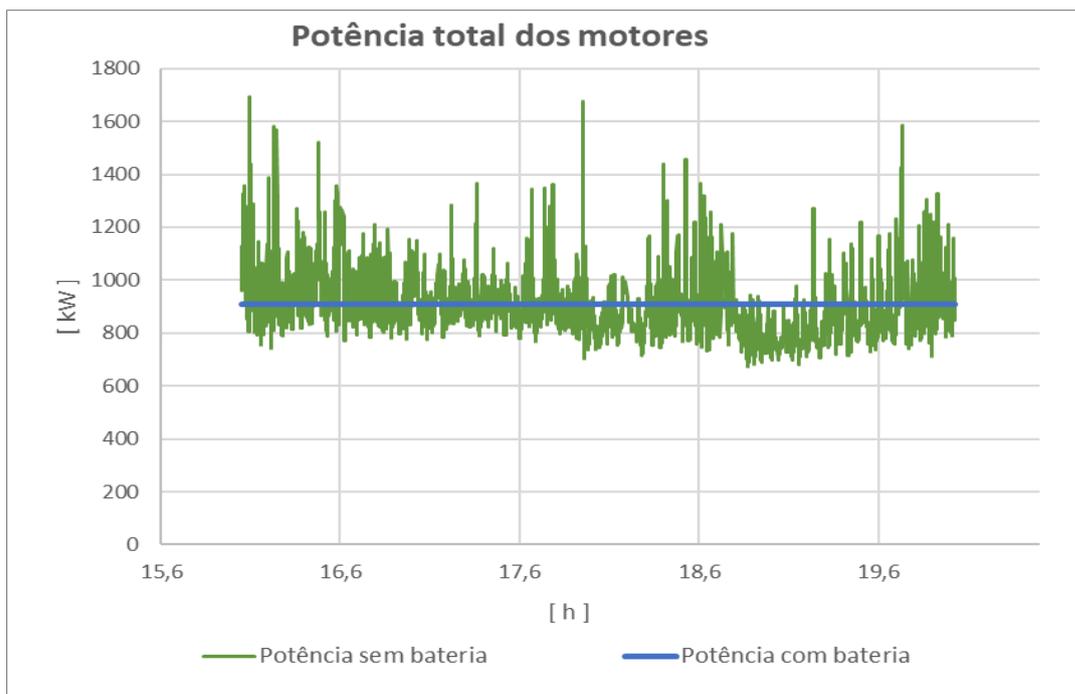


Figura 75: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação ROV4YA.

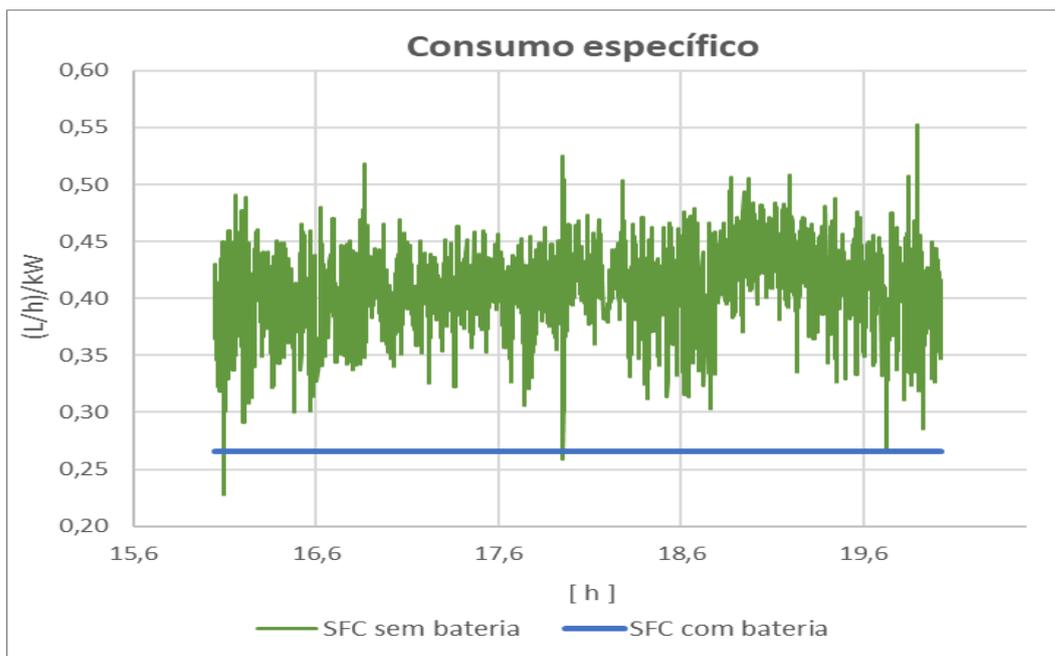


Figura 76: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação ROV4YA.

A Figura 77 mostra essa redução de consumo acumulado em termos de litros. A diferença entre as duas curvas ilustra claramente a tendência de redução de consumo para o uso hibridizado. Para este caso, houve uma redução de 410,41 litros de combustível, o que equivale a 30,71%.

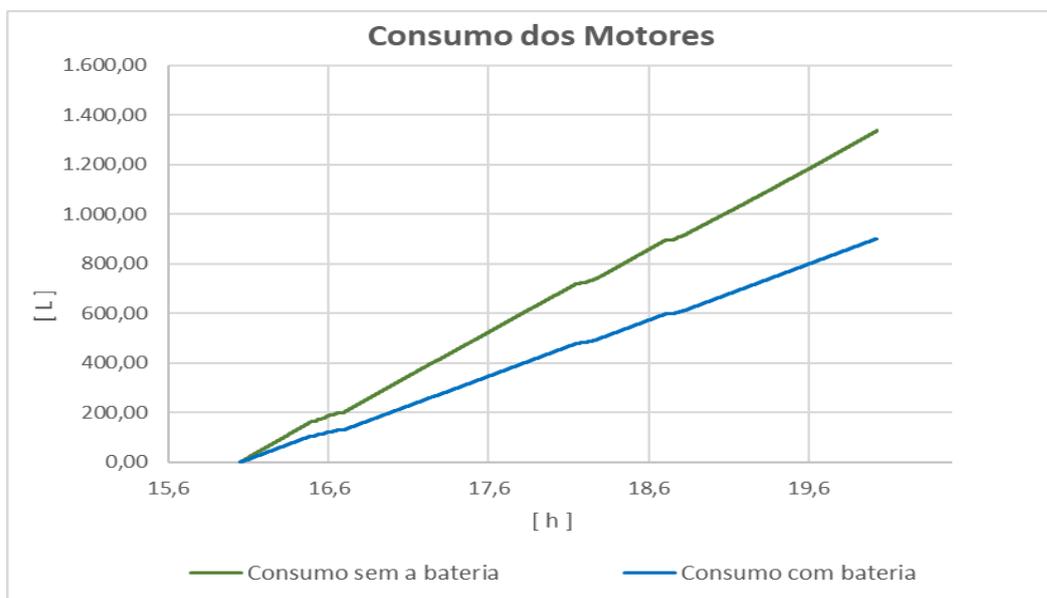


Figura 77: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação ROV4YA.

Nesta operação, o valor da potência aplicada ao motor foi de 907,78kW, não ultrapassando a potência de 1000kW, considerada como ponto de segurança da operação do motor. Além disso, em toda operação real, houve a utilização dos 4 motores, enquanto, na hibridizada simulada, apenas um motor foi utilizado, ocasionando a redução de tempo de máquina a 25% do real, o que acarreta em redução de custos de manutenção destes equipamentos.

Com relação à bateria utilizada, o gráfico da Figura 78 mostra a variação da potência na operação. Esta variação representa a contribuição da absorção dos transientes

da potência requerida pelo sistema. Isto é o que permite que os motores operem, neste caso, em carga constante. Ressalta-se que para a bateria, os valores negativos de potência evidenciam que ela está entregando potência para o barramento para alimentar a demanda do sistema, enquanto os valores positivos representam a potência com que ela é carregada.

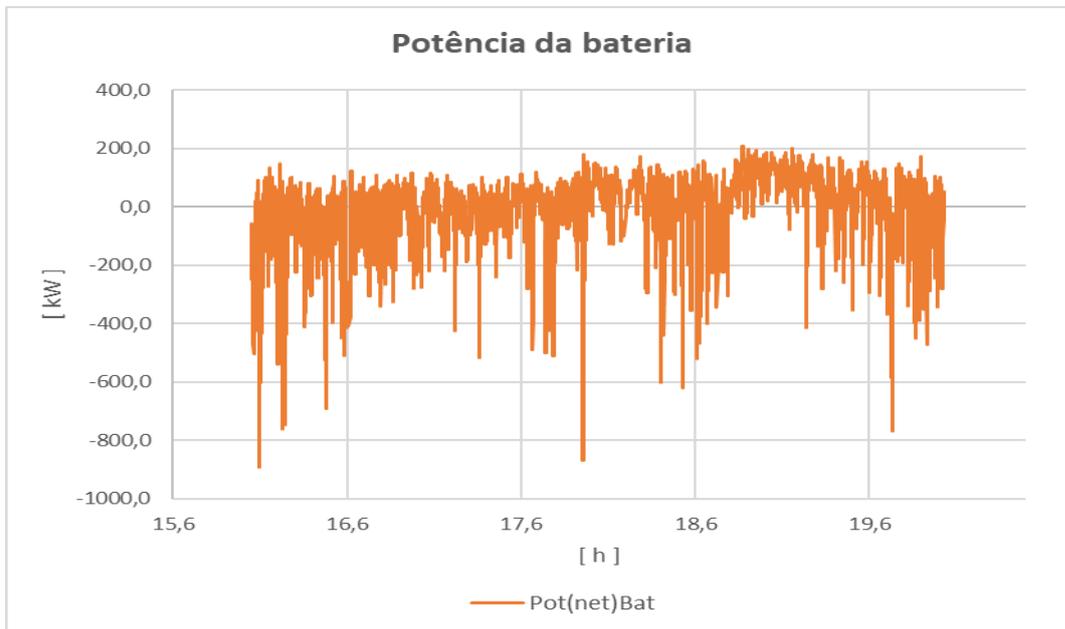


Figura 78: Potência líquida da bateria na operação ROV4YA com a estratégia DMS.

Foram calculados os SOC e CR para 6 tipos de baterias que variam quanto à sua capacidade de armazenamento, sendo estas capacidades: 100kWh; 200kWh; 300kWh; 400kWh; 500kWh e 600kWh. A Tabela 11 mostra os valores mínimos obtidos para o SOC para cada uma dessas configurações, além do CR máximo. Foi definido, nesta simulação, que o valor mínimo de SOC seria de 20%, seguindo algumas recomendações. [52]. Para o CR, também visto na Tabela 11, foi definido como restrição que o seu valor não deveria ser igual ou maior que 6, uma vez que o custo para a aquisição de baterias com esta característica tornaria inviável financeiramente a sua aplicação neste projeto. Desta forma, como observado na Tabela 11, realçado em vermelho, foi verificado que a bateria de 100kWh não seria aplicável para este tipo de operação, uma vez que o valor de CR máximo encontrado para esta bateria foi de 8,8. Já para as outras, seria possível a utilização.

A última linha da Tabela 11 mostra o tempo em que seria possível utilizar a bateria para manter a operação do navio, caso ele estivesse operando apenas com a bateria, numa emergência e com o CR máximo. Este cálculo é feito através da eq. (19).

$$\text{Tempo (minuto)} = \frac{60}{CR} \quad (19)$$

Tabela 11: Dados de SOC, CR E Tempo de operação apenas com a bateria para a operação ROV4YA na estratégia DMS.

		BATERIA					
		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh
SOC	Mínimo	0,00%	38,27%	52,18%	59,14%	63,31%	66,09%
CR	Máximo	8,88	4,44	2,96	2,22	1,78	1,48
TEMPO	Minuto	6,76	13,51	20,27	27,02	33,78	40,53

Além da tabela citada, também houve a confecção de gráficos relativos ao SOC e CR das baterias nesta operação, como podem ser evidenciados a seguir na Figura 79. Para o SOC, no gráfico da esquerda, pode-se observar o comportamento para todos os tipos de bateria, enquanto para o CR, no gráfico da direita, foram colocados apenas os valores extremos para as baterias de 100kWh e 600kWh. Percebe-se, no primeiro gráfico que, quanto menor a capacidade da bateria, maior a variação no seu SOC, já que a demanda de energia pelo sistema é a mesma em todas as situações. Já para o CR, quanto maior a capacidade da bateria em kWh, menor é o CR para uma mesma potência demandada em kW.

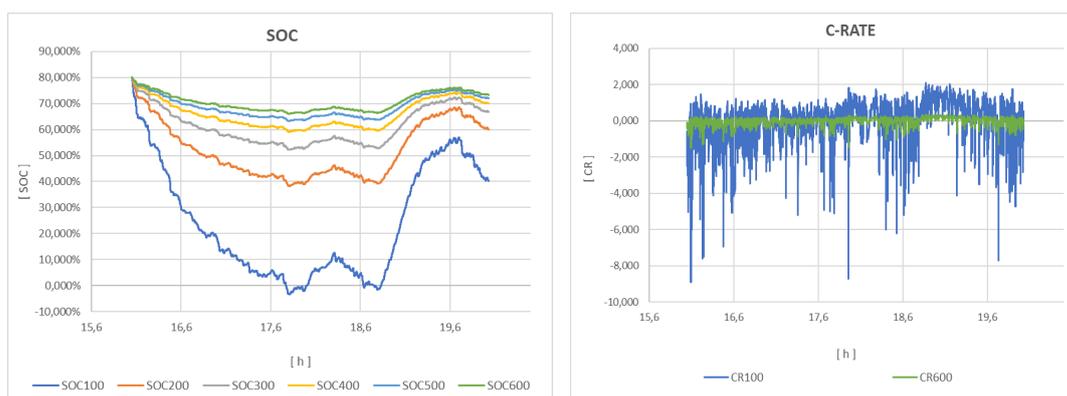


Figura 79: Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação ROV4YA na estratégia DMS.

5.5.2

STD2YA Operação com duração de 4 horas e uso da estratégia DMS

A segunda análise foi realizada para a operação com DP e a embarcação funcionando com 2 motores. Esta operação é realizada quando o navio está em alto-mar aguardando a liberação para realizar alguma manobra. Neste caso, os motores precisam absorver as cargas transientes da embarcação para manter a sua posição. No intervalo analisado, de cerca de 4 horas, na operação real, foram utilizados os motores G1 com potência média de 384kW e G3 com potência média de 378kW. O CV desta operação foi de 6,3%. No simulador, os melhores resultados foram alcançados com a estratégia DMS com a utilização de apenas um motor em conjunto com o banco de baterias. Neste caso, o motor operou com potência fixa de 762,27kW e, logicamente, por ser uma operação em estado permanente, seu CV foi zero. O gráfico da Figura 80, a seguir, mostra a atuação do SGE na situação real com o acumulado de potência gerada pelos dois motores em verde, além de ser possível observar, na parte inferior deste mesmo gráfico, o comportamento real dos dois motores G1 em azul claro e G3 na cor cinza. Novamente, na parte superior do gráfico, observa-se a operação simulada do SGE com apenas um motor em carga estacionária em azul escuro, situação em que o motor opera em carga constante, enquanto o banco de bateria absorve as cargas transientes da demanda sistema. Já no gráfico da Figura 81, pode se observar a diferença do SFC nos dois casos. Enquanto na operação real (em verde) o SFC médio foi de 0,311(L/h)/kW, para o sistema simulado com a hibridização (em azul) o SFC foi de 0,270 (L/h)/kW.

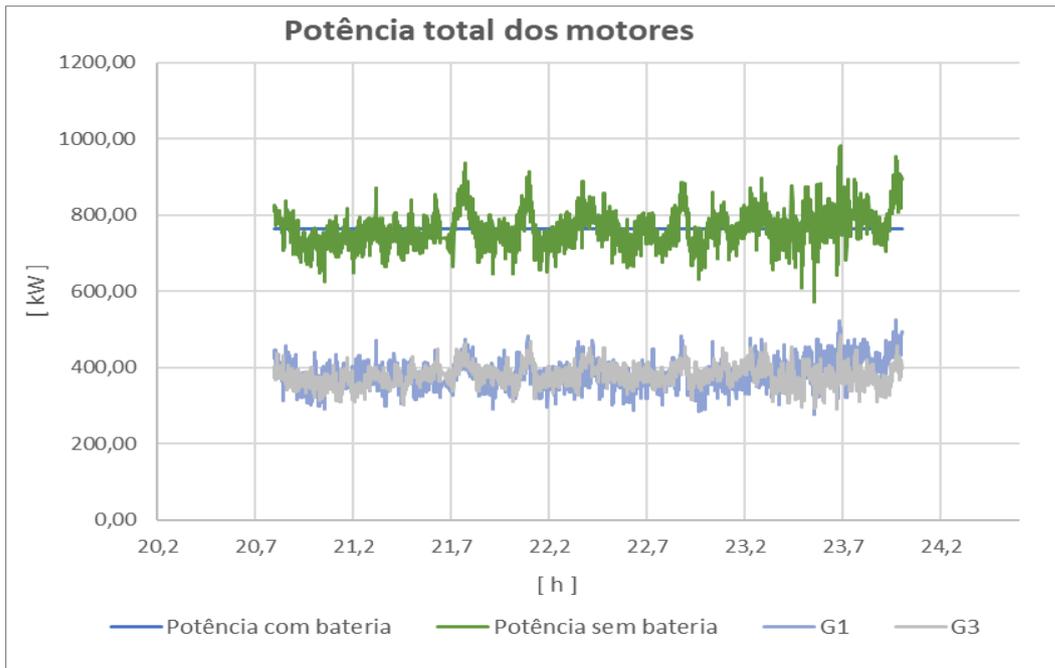


Figura 80: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação STD2YA.

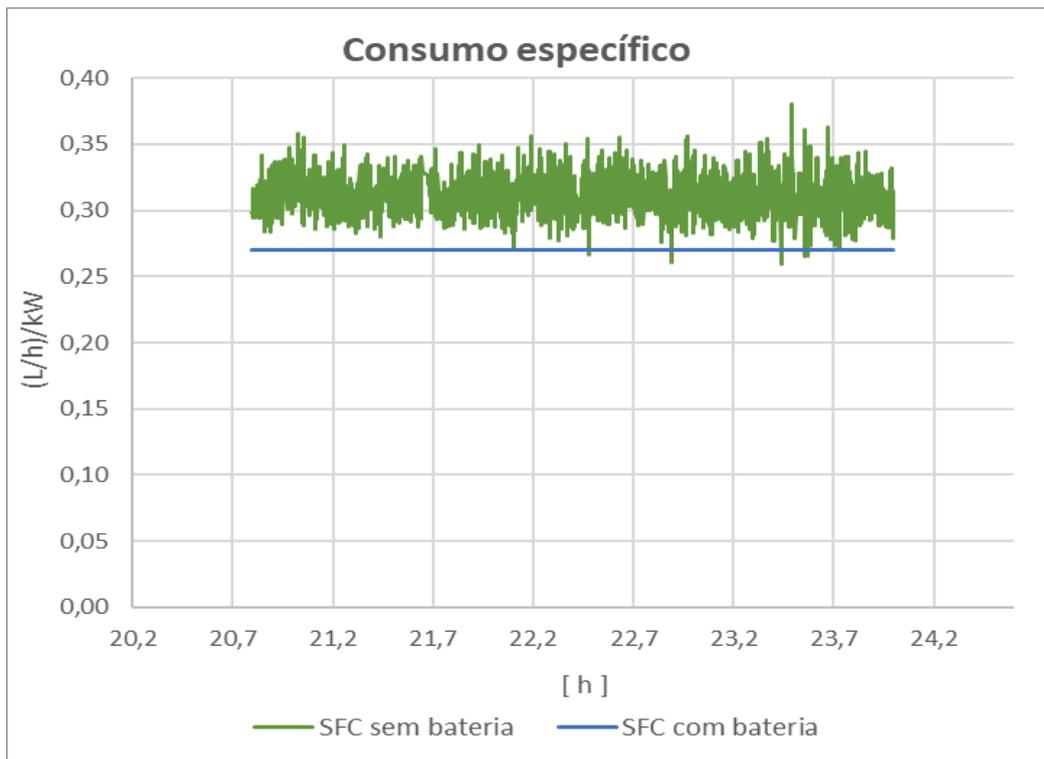


Figura 81: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação STD2YA.

A diferença entre os consumos nesta análise foi de 94,53 Litros, equivalendo a uma redução de 13,53%, como apresentado na Figura 82.

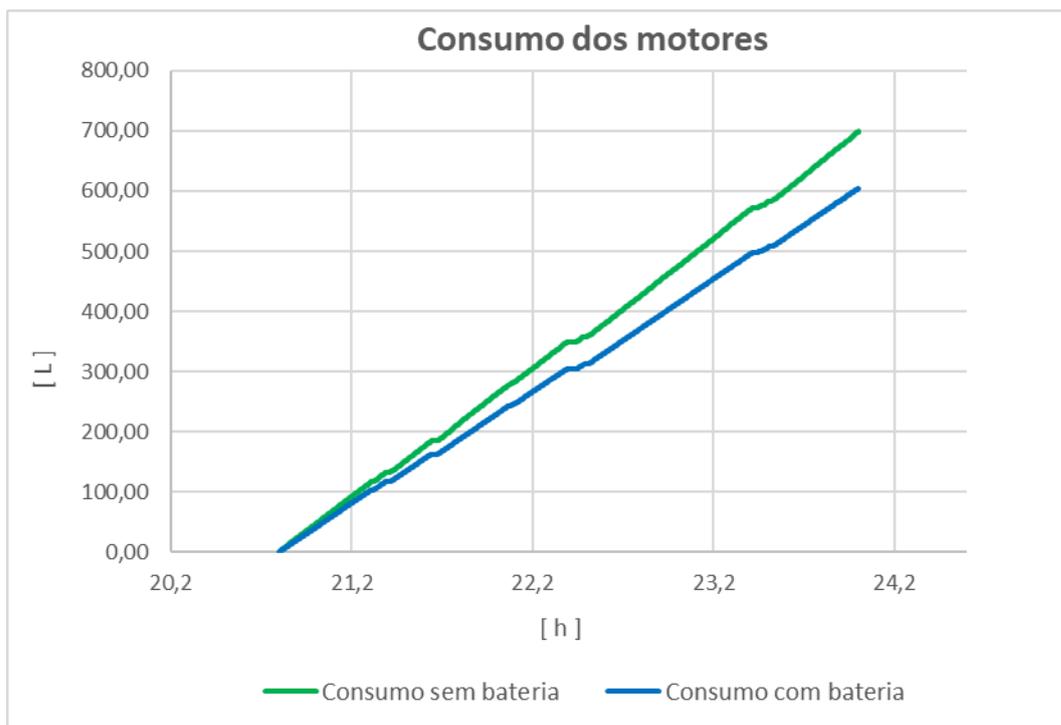


Figura 82: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação STD2YA.

No gráfico da Figura 83, observa-se a contribuição da bateria para a absorção das cargas transientes do sistema. Pela Tabela 12 e pelo gráfico da Figura 84, pode-se também verificar que a variação do SOC da bateria foi menor que na operação anterior, com o menor valor alcançado na operação sendo de 67,34% para a bateria de menor capacidade. No entanto, o SOC máximo foi bastante elevado, ultrapassando, no simulador, o valor de 90%, para a bateria de 100kW, como visto no gráfico para o SOC na Figura 84, comportamento que provocaria a redução da vida útil da bateria como visto no tópico 2.5.2. Percebe-se também que o CR máximo alcançado na operação foi de apenas 2,48, como verificado na Tabela 12, muito menor que na operação ROV4YA.

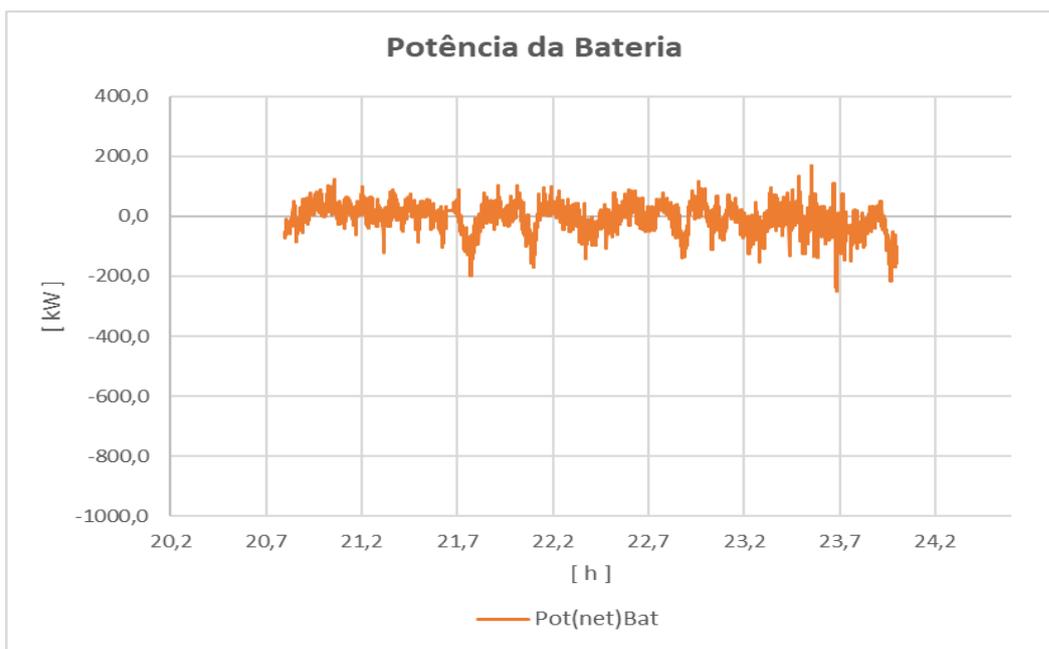


Figura 83: Potência líquida da bateria na operação STD2YA com a estratégia DMS.

Tabela 12: Dados de SOC, CR E Tempo de operação apenas com a bateria para a operação STD2YA na estratégia DMS.

		BATERIA					
		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh
SOC	Mínimo	67,34%	73,67%	75,78%	76,84%	77,47%	77,89%
CR	Máximo	2,48	1,24	0,83	0,62	0,50	0,41
TEMPO	Minuto	24,21	48,43	72,64	96,86	121,07	145,29

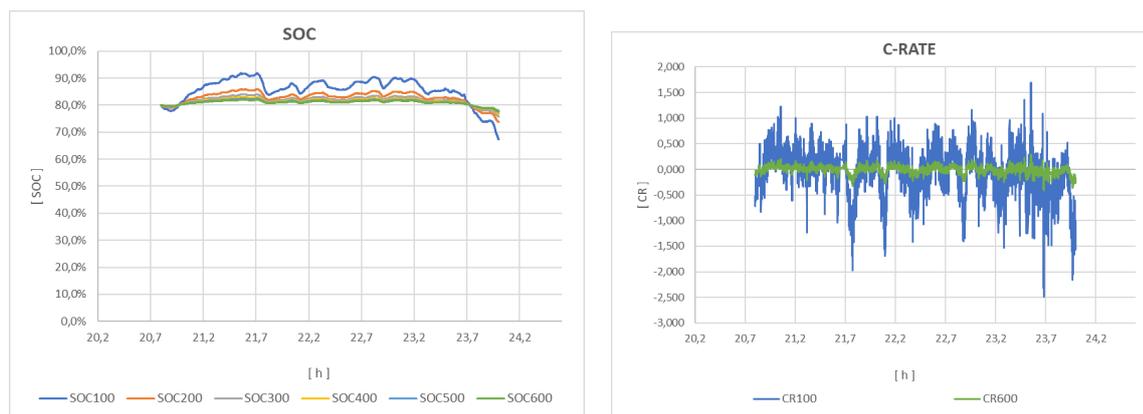


Figura 84: Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação STD2YA na estratégia DMS.

O tempo calculado para a operação apenas com a bateria, na pior situação do CR também foi obtido da Tabela 12 e observou-se que, mesmo com a bateria de menor capacidade, seria possível chegar a praticamente 25 minutos de operação, muito superior aos pouco mais de 6 minutos, na análise da operação anterior.

Transparece, a partir dos dados, que o comportamento menos transiente do sistema contribui para uma menor possibilidade de ganho com a utilização da bateria, refletido na diferença dos ganhos de consumo nas duas análises feitas até o momento. Como já visto, na primeira (ROV4YA) o CV na operação real foi de 13,7% e a redução do consumo com o uso da hibridização simulada foi de 30,71%. Já neste caso, com a operação de *Stand- By* com 2 motores, o CV foi de 6,3% e a economia foi de 13,53%.

As próximas avaliações foram feitas, ambas, com operação em que a embarcação está navegando, ou seja, com o navio se deslocando de um ponto ao outro de forma mais contínua, sem operação em DP. Em ambos os casos, foram utilizados apenas dois motores na operação. No entanto, enquanto no primeiro caso, a operação foi realizada com o barramento fechado, no outro o barramento permaneceu aberto.

5.5.3

NAVEG2NF Operação com duração de 3,5 horas e uso da estratégia MM1000

No exemplo da Figura 85, percebe-se a comparação entre a operação real e a simulada com a hibridização para a operação em navegação com dois motores em funcionamento e com o barramento fechado. Nesta operação, ambos os motores foram mantidos em cargas semelhantes, próximas a 500kW, sendo o CV da operação real, sem a hibridização, no valor de 2,63%. Na simulação, apenas um motor foi utilizado com a melhor estratégia sendo a MM1000 com valor médio de carga sendo de 981,28kW e CV de 0,51%.

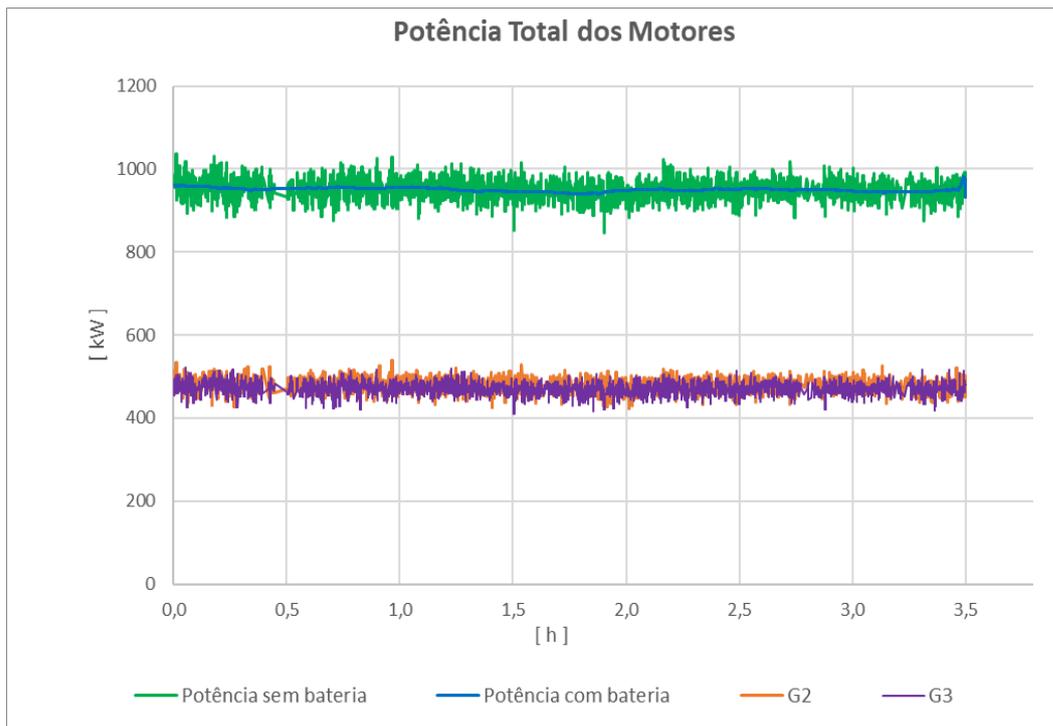


Figura 85: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NF.

Para esta operação, houve redução do SFC de $0,30(\text{L/h})/\text{kW}$ na operação real para $0,26(\text{L/h})/\text{kW}$ na operação simulada, acarretando uma redução total de 10,7% de consumo, equivalente a 94,52 Litros. Observa-se uma economia menor que a conseguida na operação anterior, o que pode ser explicado pelo fato da operação em navegação ter como característica pouca transiência no motor, refletido em um baixo CV.

A variação do consumo específico pode ser visto no gráfico da Figura 86 e a variação de consumo em litros na situação real e simulada pelo gráfico da Figura 87.

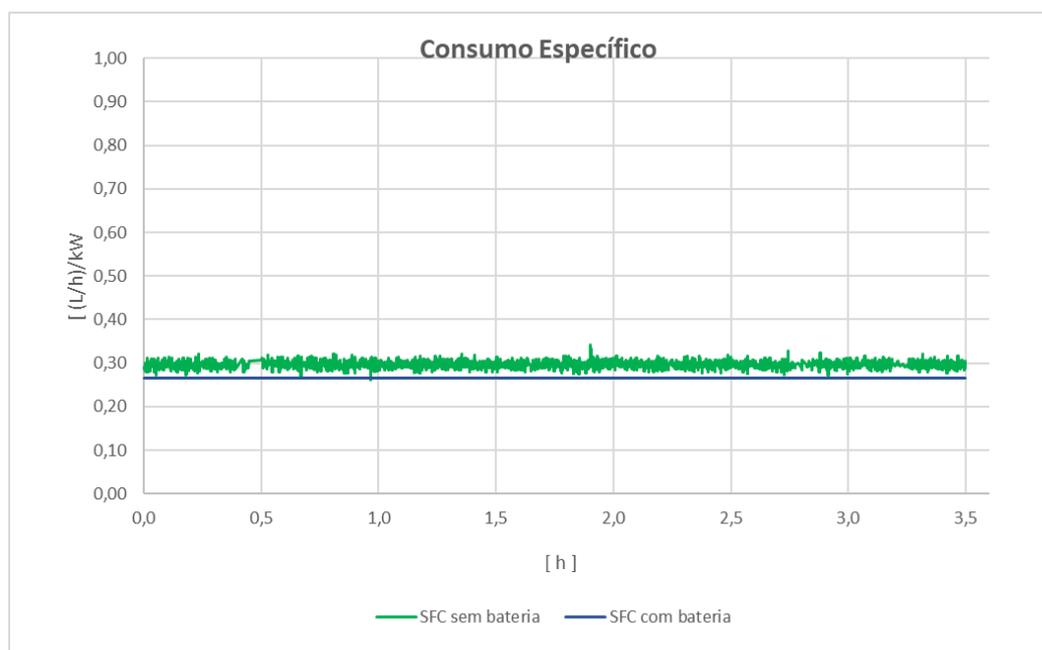


Figura 86: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NF.

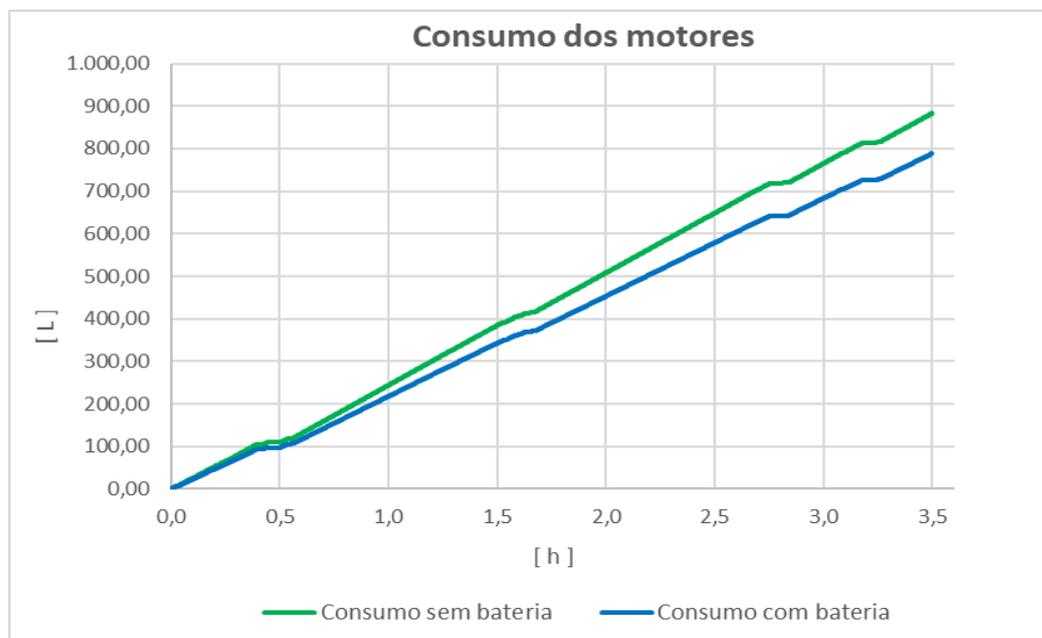


Figura 87: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NF.

Novamente, tem-se o gráfico que apresenta a absorção da potência do sistema, em especial às cargas transientes, pela bateria (Figura 88). Nota-se, em comparação com a operação ROV, que a bateria varia muito menos a sua potência, o que também é explicado pelo fato desta operação ser menos transiente que a anterior em DP, não sendo necessário o uso tão intenso da bateria, neste caso.

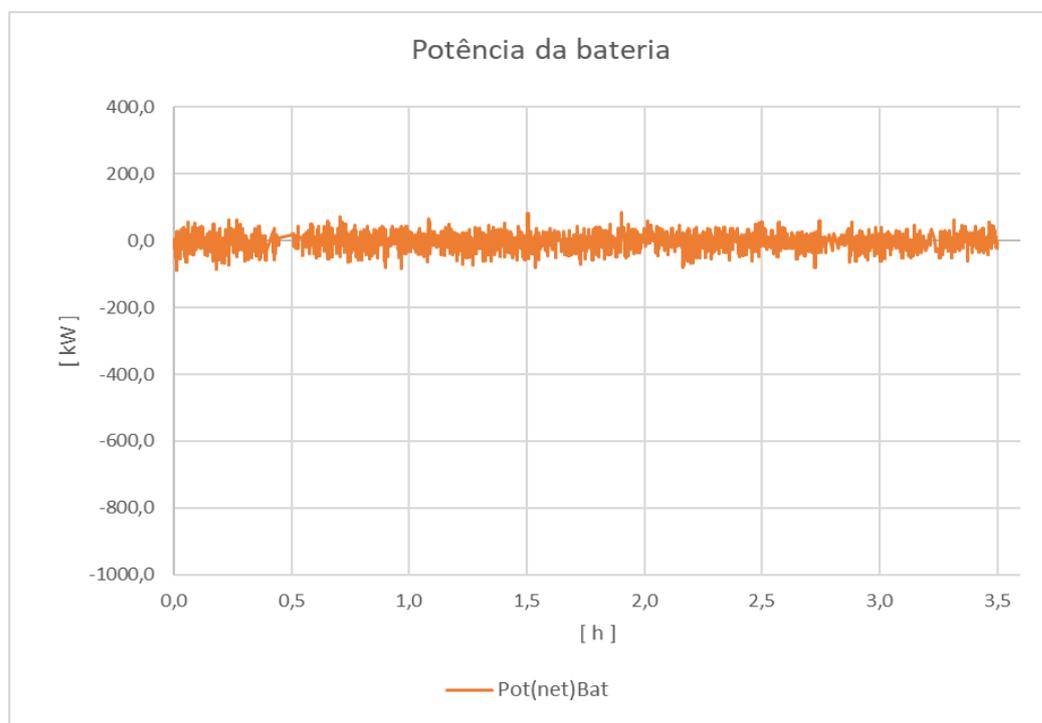


Figura 88: Potência líquida da bateria na operação NAVEG2NF com a estratégia MM1000.

Como a variação de potência foi menor, a bateria tende a influenciar menos no sistema, o que reflete na sua baixa variação do SOC e também no baixo valor de CR máximo alcançado, como visto na Figura 89 e na Tabela 13. Não houve, inclusive, restrição para o uso das baterias selecionadas, no que se refere à SOC nem CR. A potência máxima

do motor foi de 981,28 kW sendo utilizada a estratégia de apenas um motor em operação. O menor valor para o tempo de utilização apenas da bateria foi superior a 69 minutos, para a bateria de 100kWh.

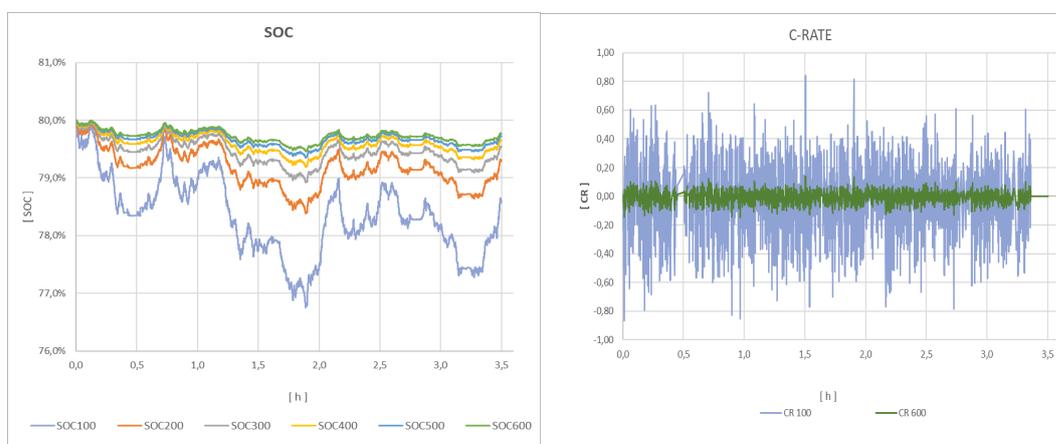


Figura 89: Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação NAVEG2NF na estratégia MM1000.

Tabela 13: Dados de SOC, CR E Tempo de operação apenas com a bateria para a operação NAVEG2NF na estratégia MM1000.

		BATERIA					
		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh
SOC	Mínimo	76,76%	78,38%	78,92%	79,19%	79,35%	79,46%
CR	Máximo	0,86	0,43	0,29	0,22	0,17	0,14
TEMPO	Minuto	69,40	138,80	208,20	277,60	347,00	416,40

5.5.4

NAVEG2NA Operação com duração de 4 horas e uso da estratégia MM1000

Nesta segunda operação em navegação, semelhante à anterior, mas com algumas diferenças, o resultado obtido mostrou que a aplicação da hibridização, não seria justificada. Nesta situação, o barramento mantém-se aberto com os motores G1 e G3 em funcionamento. No entanto, por uma característica desta operação, os motores se mantiveram na faixa de operação próxima à otimizada com relação ao SFC com 843kW para o G1 e 834kW para o G3 como visto na Figura 90, com o CV da operação sendo de 1,63%.

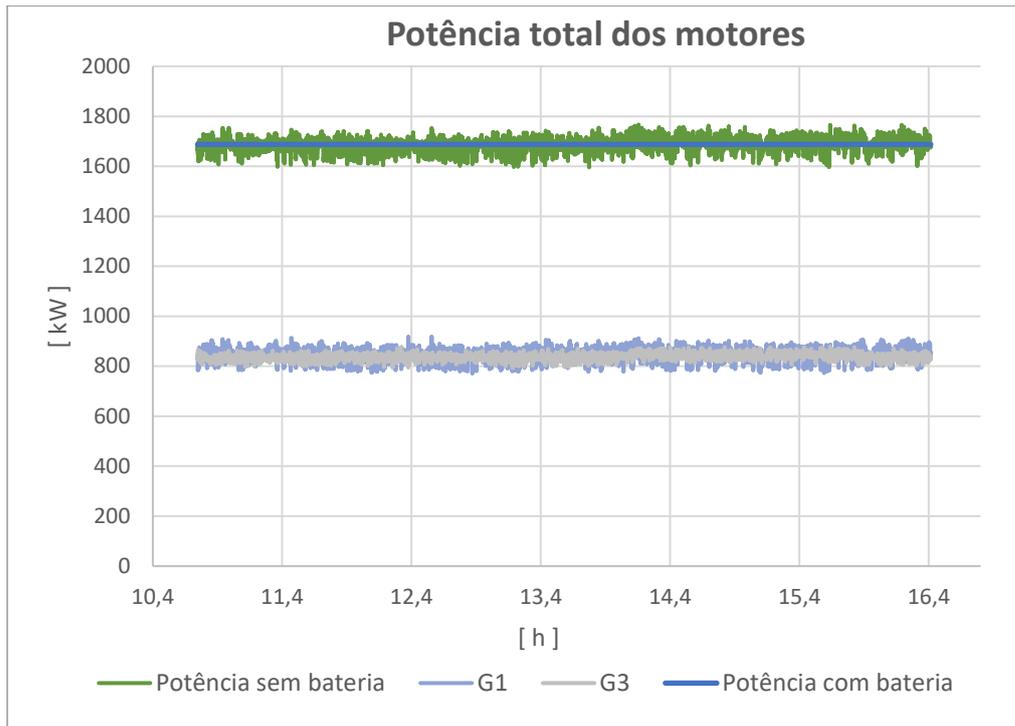


Figura 90: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando apenas um motor na hibridização.

Os gráficos da Figura 91 e Figura 92 mostram, respectivamente, os resultados para o SFC real e simulado, assim como para os consumos em Litros em ambos os casos. Neste caso, houve uma pequena redução do consumo, de apenas 2,77% ou seja 66,49 litros. A contribuição do uso do sistema de hibridização não foi tão significativa quanto na operação anterior, devido ao fato da escolha da potência dos motores na situação real ter se aproximado da faixa otimizada para o consumo, nesta última operação com os motores operando com potências médias em torno de 840kW, cada.

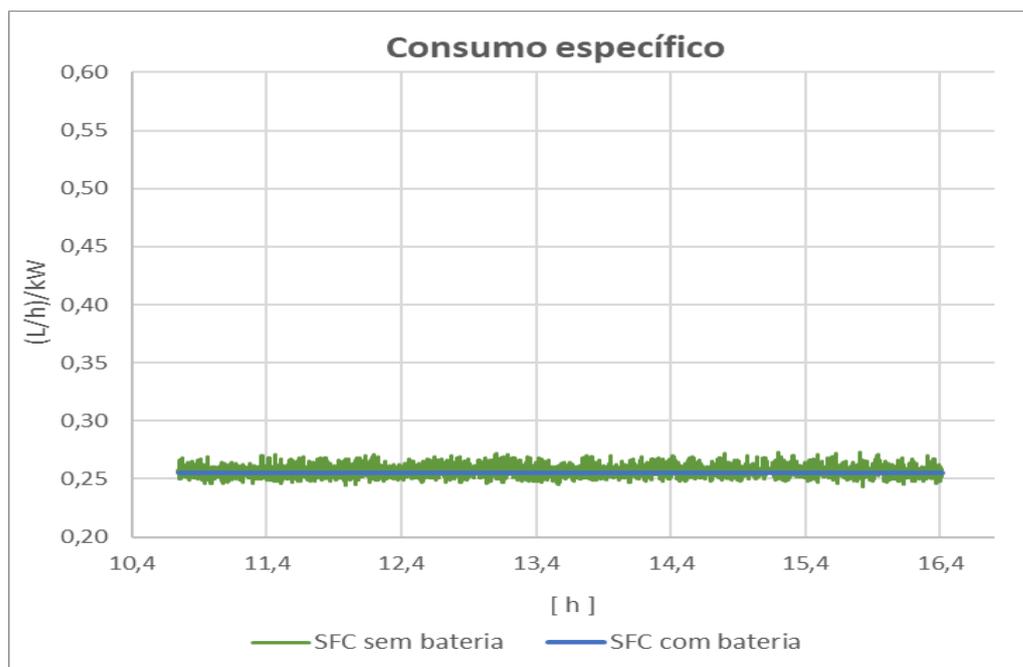


Figura 91: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, , utilizando apenas um motor na hibridização.

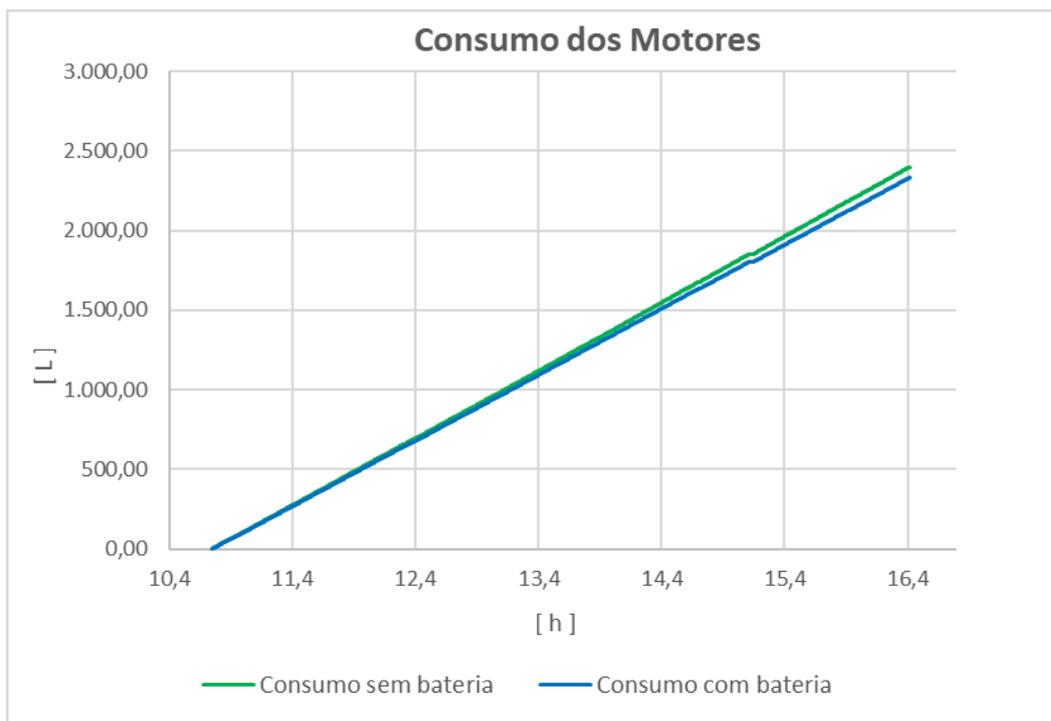


Figura 92: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando apenas um motor na hibridização.

No entanto para se chegar ao percentual de redução de 2,77% na simulação, foi necessário adotar a estratégia do uso de apenas um motor na hibridização. Com isso, a potência média de operação do motor deveria ser de 1687,74kW superando o limite estabelecido de 1000kW para efeito de segurança da operação. Logo, teve-se que alterar a estratégia para a utilização de 2 motores, operando juntamente com o sistema de hibridização. Nessa nova estratégia, todos os resultados da hibridização para redução de consumo foram negativos. Ao final da operação o consumo simulado foi de 2490,11 litros enquanto o consumo real foi de 2398,57, sendo 3,82% menor que o simulado. Os gráficos da Figura 93 e Figura 94 evidenciam esta alta no consumo com a hibridização. No primeiro, observa-se a linha em azul representando o consumo na hibridização, maior neste caso que o consumo sem a bateria, visto em verde. De forma semelhante, percebe-se no segundo gráfico o maior valor de SFC para a situação com hibridização em azul. Para este fato, entende-se que os resultados melhores na operação real se devem à baixa transiência da operação, atrelado ao fato de os motores poderem estar “amaciados” ou seja, com desempenho melhores do que aqueles obtidos nos dados de fábrica, quando o motor utilizado é novo, como poucas horas de trabalho. Ressaltando que estes dados do fabricante foram utilizados para confeccionar a curva FC x Potência utilizada para calcular o consumo na situação com a hibridização eq. (17)

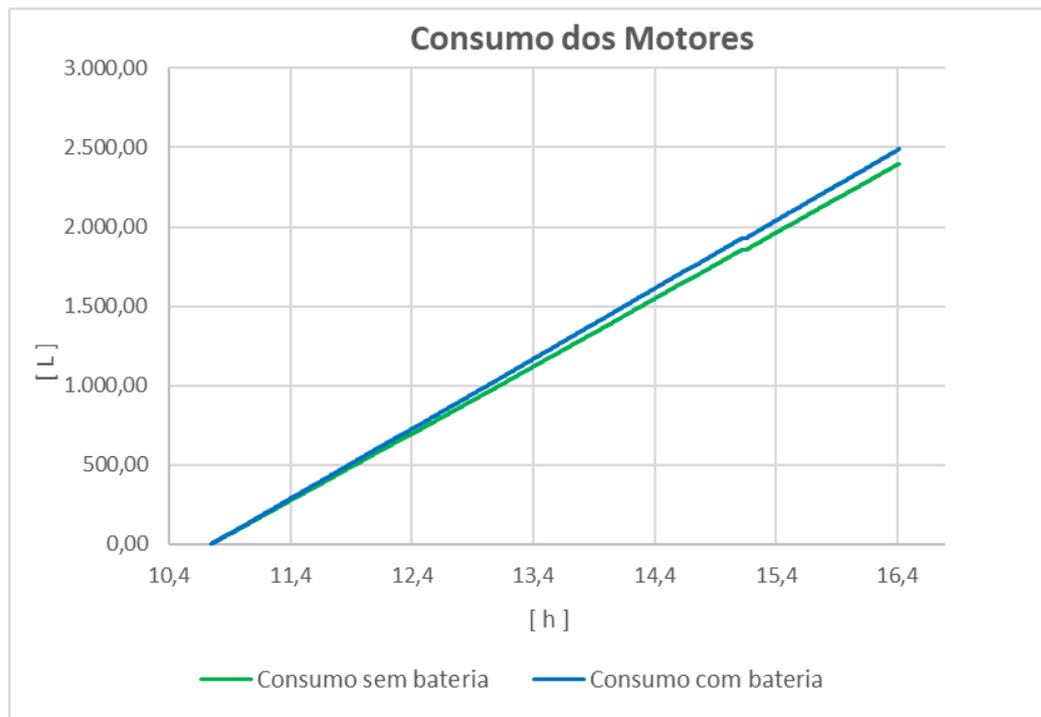


Figura 93: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando dois motores na hibridização.

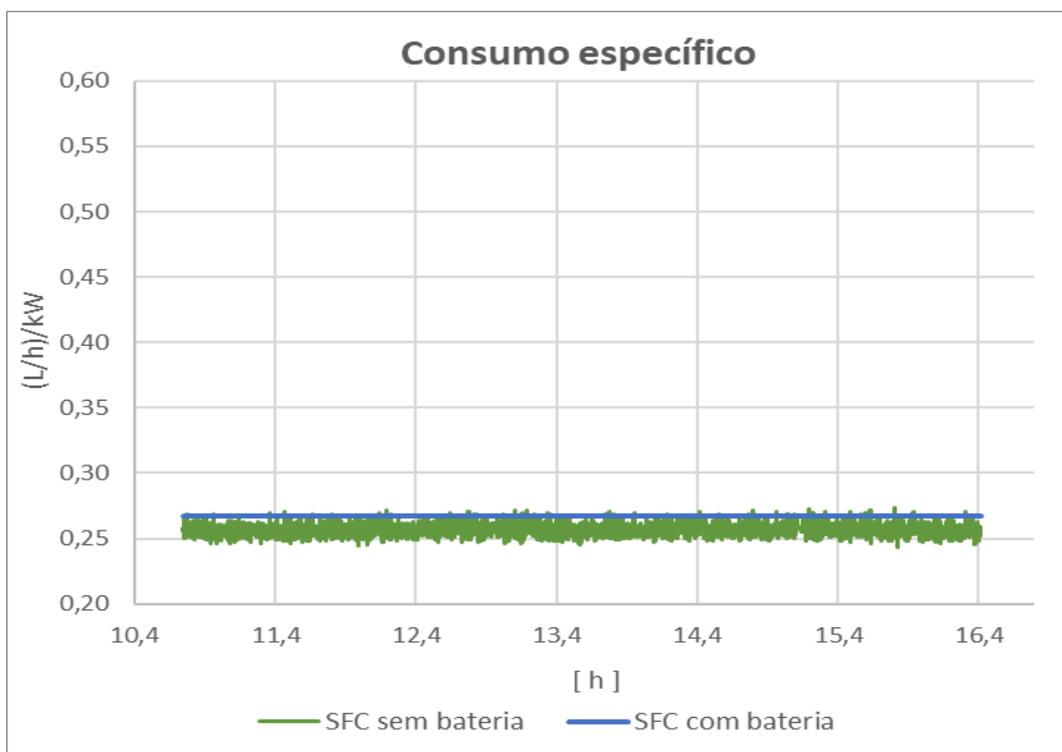


Figura 94: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação NAVEG2NA, utilizando dois motores na hibridização.

5.5.5

Porto start/stop

Para aquelas operações em que o navio não está nem em DP nem em navegação, dar-se-á o nome de operação de Porto, mesmo o navio estando apenas fundeado em alto mar ou parado na costa. Para estas operações, foi adotado um procedimento diferente dos vistos até agora. Nos casos anteriores, manteve-se durante toda a operação, pelo menos um motor em funcionamento. Já para esta operação, pelo fato do navio está parado em situação de maior segurança e sem a necessidade de ser manobrado, há a possibilidade de ele operar em alguns momentos, apenas com a bateria. Nesta estratégia, isto foi feito. A estratégia utilizada foi absorver toda a carga da demanda do sistema pela bateria e após ela chegar ao valor limite de carregamento, acionar-se o motor (neste caso apenas um motor) na carga otimizada pelo SFC, que aqui foi adotada de 815 kW de acordo com os dados do fabricante. O motor, então, operaria em conjunto com a bateria até que ela fosse carregada com SOC de 80%. Neste momento, o motor é novamente desligado e o sistema volta a operar apenas com a bateria. O gráfico da Figura 95 mostra a potência dos motores com os dados reais sem a bateria sinalizada na cor verde e com a simulação na estratégia citada na cor azul.

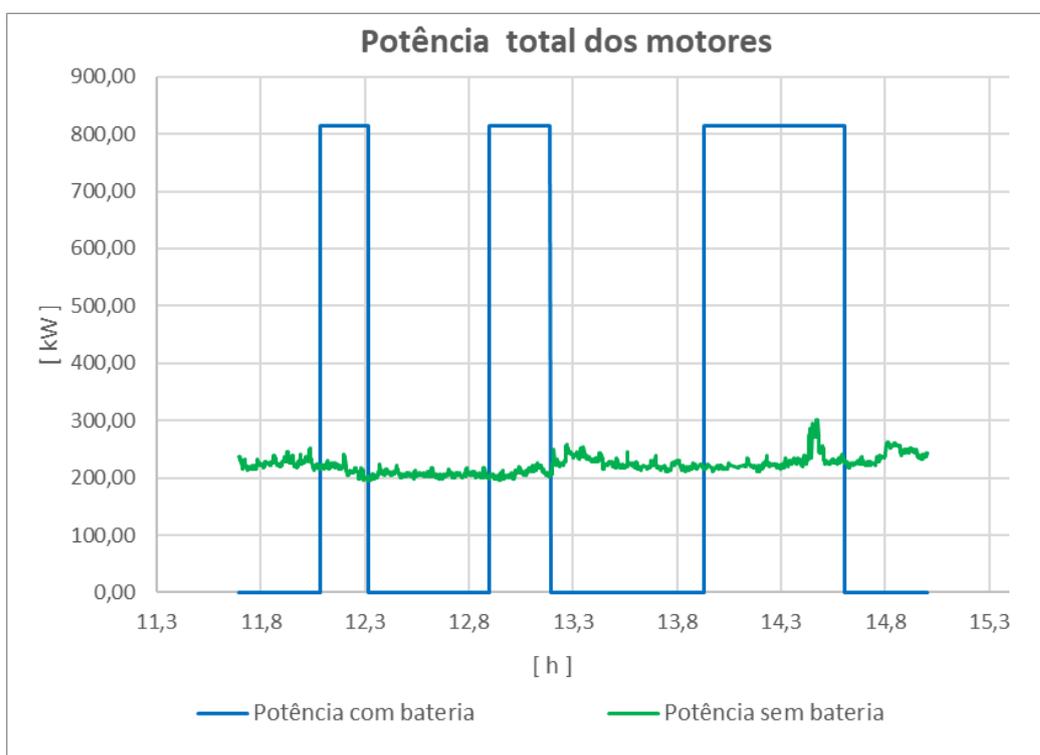


Figura 95: Comparação de potência dos motores com e sem bateria para a operação PORTO.

Observa-se que, enquanto na situação real o motor opera constantemente numa potência próxima a 200kW, sendo essa uma faixa de operação de baixa eficiência, na situação simulada, ele intercala a operação na faixa de 815kW com momentos em que está desligado. O gráfico Figura 96 ilustra a diferença do consumo específico nos dois casos citados, assim como o gráfico da Figura 97 mostra a diferença em litros nas duas situações.

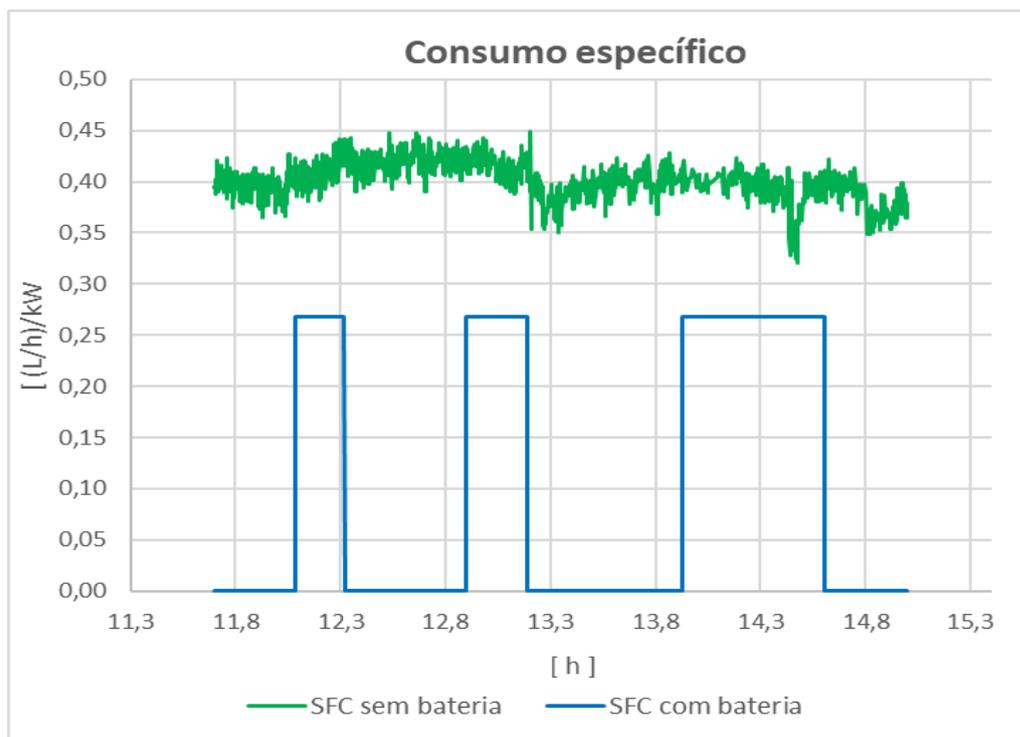


Figura 96: Comparação de consumo específico dos motores com e sem bateria para a operação PORTO.

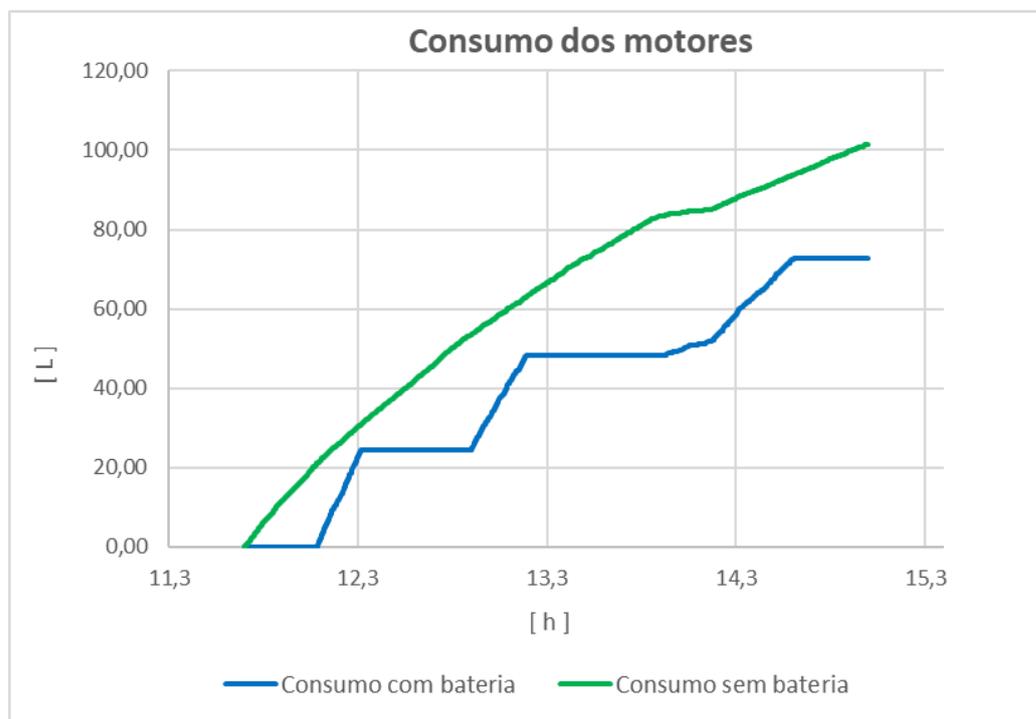


Figura 97: Comparação de consumo dos motores com e sem bateria para a operação PORTO.

A redução do consumo nesta situação chegou a 28,31% com uma redução total de 28,76 litros. É importante ressaltar que, neste caso, além da redução do consumo, uma outra questão deve ser levada em conta que é a redução de emissões em região urbana como os portos, proporcionada por esta estratégia. Em situações com restrições de emissão, ou até mesmo com políticas de tolerância zero para emissões, esta estratégia pode ser utilizada, realizando o carregamento da bateria fora destas regiões e operando com o navio apenas

com a bateria nas zonas com restrições. O gráfico da Figura 98 mostra o comportamento da bateria nesta situação. Percebe-se claramente a diferença de potência quando ela entrega carga ao sistema (valores negativos) e quando está sendo carregada (valores positivos).

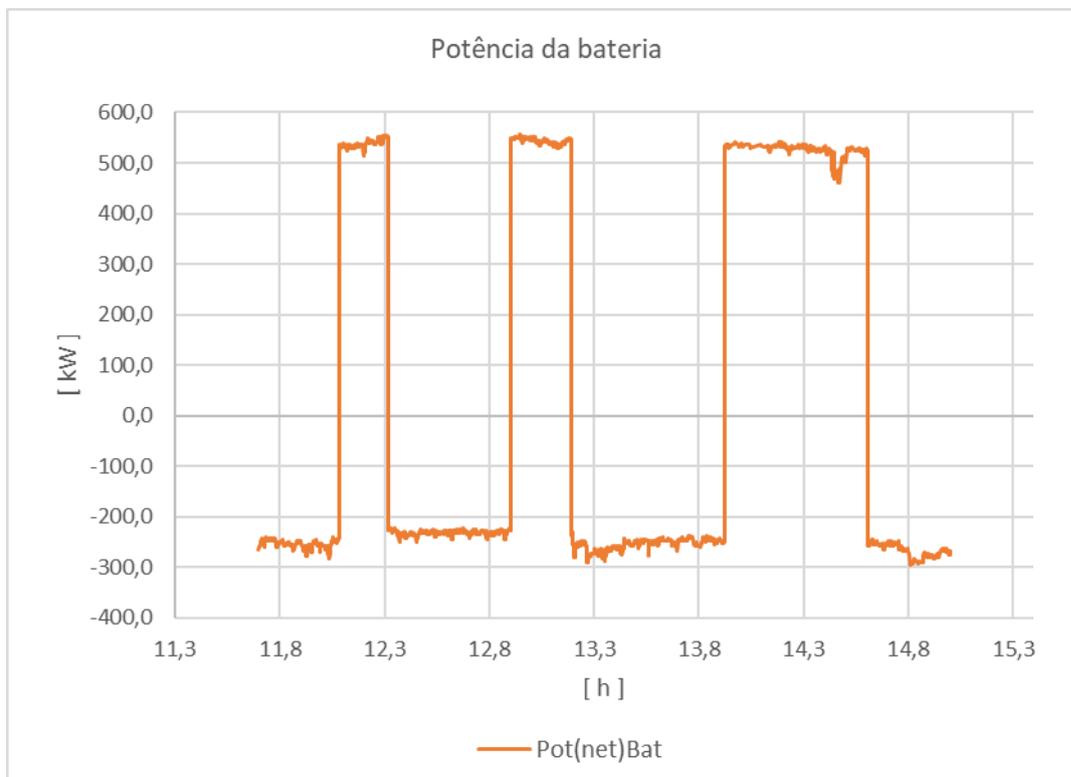


Figura 98: Potência Líquida da bateria na operação PORTO.

Para a análise das baterias, observa-se que não houve restrição, neste caso, para nenhuma delas, apesar do valor muito próximo ao mínimo para o SOC com a bateria de 100kWh, com valor de 20,10% e o CR próximo ao máximo, sendo ele de 5,56, como visto na Tabela 14.

Tabela 14: Dados de SOC, CR e Tempo de operação apenas com a bateria para a operação PORTO.

		BATERIA					
		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh
SOC	Mínimo	20,10%	50,05%	60,03%	65,02%	68,02%	70,02%
CR	Máximo	5,56	2,78	1,85	1,39	1,11	0,93
TEMPO	Minuto	10,79	21,58	32,36	43,15	53,94	64,73

Além da tabela acima, os gráficos da Figura 99 mostram, respectivamente, as variações do SOC e CR. Observa-se que os casos foram considerados, levando-se em conta a capacidade da bateria de 100kWh, uma vez que esta seria a bateria de menor capacidade e, por consequência, a mais susceptível a não atender a uma das restrições impostas para a sua escolha.

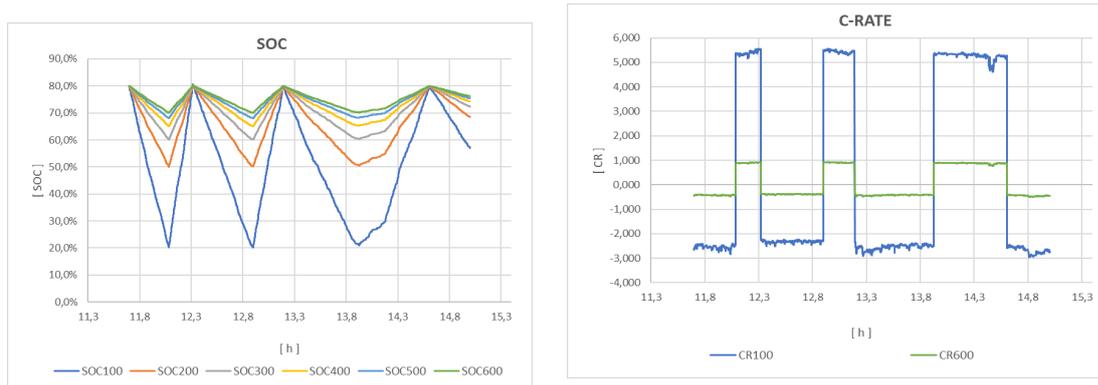


Figura 99: Gráficos de SOC para as diferentes baterias e CR para as baterias de 100kWh e 600kWh, ambos para a operação PORTO.

5.6

Análise da variação das estratégias de hibridização

Agora que já foram feitas as análises para os diferentes tipos de operação da embarcação, deseja-se verificar a influência das diferentes estratégias de hibridização adotadas. Para esta análise, serão abordadas as duas operações em DP vistas até aqui, sendo a operação ROV4YA e a operação STD2YA. A comparação terá seu foco nos resultados obtidos para a redução de consumo em cada uma das estratégias. Deve-se observar que apenas a estratégia DMS possui valor de CV nulo. Todas as outras, por se tratar de médias móveis, terão alguma alteração de potência no motor ou conjunto de motores, mesmo na operação simulada com hibridização. Como já visto no tópico 4.6.2, há uma penalização para este comportamento transiente, o que pode afetar o consumo. No entanto, em alguns casos, o fato de a operação com média móvel levar o motor a funcionar em faixas mais próximas da operação ótima com menor SFC pode compensar esta penalização, levando a um consumo menor do que na estratégia DMS.

5.6.1

ROV4YA 1 hora

Primeiramente, será feita a análise com a operação ROV4YA. Para esta análise, foi escolhida uma operação de pouco menos de uma hora, ou seja 0,75h. Nela, os 4 motores estiveram em operação durante todo o tempo. Os valores médios das potências em cada motor foram de 188kW para G1, 194,8 kW para G2, 287 kW para G3 e 298kW para G4. O CV da operação foi de 14,45%. Já na simulação com a hibridização, foram aplicadas todas as estratégias utilizando apenas um motor em funcionamento em conjunto com o banco de baterias. O gráfico da Figura 100 mostra a potência gasta pelo SGE sem a bateria, na sua operação real, visto na linha mais clara ao fundo, além dos comportamentos destes motores em algumas das estratégias adotadas. Apesar de terem sido analisadas todas as médias móveis citadas no tópico 4.8.4, foram escolhidas no gráfico, apenas, as estratégias DMS, MM50, MM250 e MM1000, para não deixá-lo poluído. A Tabela 15 contém os resultados para todas as estratégias analisadas.

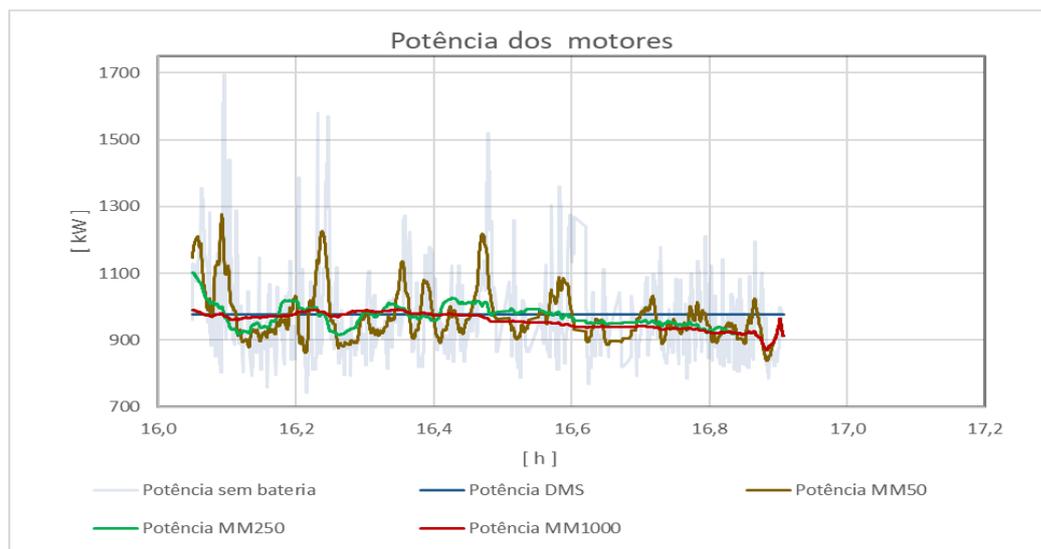


Figura 100: Comparação do comportamento do SGE sem a bateria e com as estratégias DMS, MM50, MM250 e MM1000 para a operação ROV4YA .

Na Figura 100, percebe-se que quanto menor o valor do intervalo para o cálculo da média móvel, maior o comportamento transiente do SGE. Isto se dá pelo fato desta média “flutuar” de acordo com os valores da potência da demanda do sistema de forma mais sensível, quanto menor for o valor do intervalo da média móvel. Desta maneira, na simulação híbrida, utilizando médias móveis menores, a bateria absorve em menor porcentagem a parcela transiente das cargas da demanda do sistema e, por consequência, maior tende a ser o consumo dos motores.

Na Tabela 15, encontram-se os principais valores calculados para as diferentes estratégias estudadas para a simulação deste caso. Observa-se por ela que, quanto menor o CV da estratégia adotada, há uma tendência em se obter maior redução do consumo. Esta relação é mais clara nas estratégias de menor média móvel, mais especificamente entre as médias de 50s, 100s e 250s. Já para as médias móveis de 500s, 1000s e a estratégia de média simples, os valores da redução se aproximam muito. Vê-se que, enquanto nas primeiras 3 estratégias, a diferença máxima percentual da redução do consumo foi de 3,16% (diferença entre a redução de consumo na estratégia MM50 e MM250), a variação percentual máxima entre as 3 últimas estratégias foi de apenas 0,71% (entre MM500 e DMS). Como já explicando anteriormente, o modelo utilizado no simulador possui uma penalidade no consumo, de acordo com o valor do CV da estratégia. Este fator influencia com maior intensidade as estratégias de menor média móvel. Já nos valores maiores, esta penalidade é menos relevante. Desta forma, como o CV para os dois casos, MM500 e MM1000 permaneceram na faixa de 2% a 3% como visto na Tabela 16, a penalização foi de 0,75% de acordo com os valores estabelecidos pela Tabela 8. Outro fator que tem influência na variação do consumo é a relação entre SFC e Potência, como visto no gráfico da Figura 60. Retornando a este gráfico, observa-se que há uma tendência de queda do SFC com o aumento da potência, mas que esta queda é menos sensível a partir da potência de 750kW. Há, inclusive, uma leve tendência de aumento do SFC entre 750kW e 950kW e mantendo certa estabilidade até a potência de 1150kW onde volta novamente a ter uma leve queda. Como, nas simulações entre MM500 e DMS, as faixas médias de operação estiveram entre 950kW e 975kW (Tabela 17), o efeito combinado da penalização e também da relação Potência x SFC resultaram na obtenção do melhor resultado para o uso da estratégia MM1000, ou seja, para a média móvel de 1000s e não para a DMS com a estratégia de utilização de média simples e, conseqüentemente, CV nulo. Os gráficos da Figura 101 auxiliam nesta análise mostrando os consumos em litros para os casos analisados, assim como o o consumo específico.

Tabela 15: Dados de saída par as diferentes estratégias adotadas para a simulação com hibridização para uma operação em ROV4YA.

OPERAÇÃO			ROV 4 YA	PERÍODO	0,752	Horas
DADOS M.M.50	Consumo total com Bateria [L]	Consumo total sem Bateria [L]	Diferença de consumos [L]	BATERIA		
	203,98	277,71	73,74	100 kWh	200 kWh	300 kWh
			26,55%	400 kWh	500 kWh	600 kWh
	SOC	Mínimo		78,12%	79,06%	79,37%
	CR	Máximo		6,47	3,23	2,16
	TEMPO	Minuto		9,28	18,55	27,83
CV da estratégia	8,27%	Potência máxima em cada gerador c/ bateria				
		G1	G2	G3	G4	
		1275,70	0,00	0,00	0,00	
DADOS M.M.100	Consumo total com Bateria [L]	Consumo total sem Bateria [L]	Diferença de consumos [L]	BATERIA		
	200,58	277,71	77,13	100 kWh	200 kWh	300 kWh
			27,77%	400 kWh	500 kWh	600 kWh
	SOC	Mínimo		75,93%	77,96%	78,64%
	CR	Máximo		7,22	3,61	2,41
	TEMPO	Minuto		8,32	16,63	24,95
CV da estratégia	6,33%	Potência máxima em cada gerador c/ bateria				
		G1	G2	G3	G4	
		1139,50	0,00	0,00	0,00	
DADOS M.M.250	Consumo total com Bateria [L]	Consumo total sem Bateria [L]	Diferença de consumos [L]	BATERIA		
	195,22	277,71	82,49	100 kWh	200 kWh	300 kWh
			29,71%	400 kWh	500 kWh	600 kWh
	SOC	Mínimo		71,95%	75,97%	77,32%
	CR	Máximo		8,17	4,08	2,72
	TEMPO	Minuto		7,35	14,69	22,04
CV da estratégia	3,90%	Potência máxima em cada gerador c/ bateria				
		G1	G2	G3	G4	
		1102,64	0,00	0,00	0,00	
DADOS M.M.500	Consumo total com Bateria [L]	Consumo total sem Bateria [L]	Diferença de consumos [L]	BATERIA		
	192,96	277,71	84,75	100 kWh	200 kWh	300 kWh
			30,52%	400 kWh	500 kWh	600 kWh
	SOC	Mínimo		69,04%	74,52%	76,35%
	CR	Máximo		8,24	4,12	2,75
	TEMPO	Minuto		7,28	14,56	21,83
CV da estratégia	2,87%	Potência máxima em cada gerador c/ bateria				
		G1	G2	G3	G4	
		1011,45	0,00	0,00	0,00	
DADOS M.M.1000	Consumo total com Bateria [L]	Consumo total sem Bateria [L]	Diferença de consumos [L]	BATERIA		
	192,19	277,71	85,53	100 kWh	200 kWh	300 kWh
			30,80%	400 kWh	500 kWh	600 kWh
	SOC	Mínimo		66,01%	73,00%	75,34%
	CR	Máximo		8,16	4,08	2,72
	TEMPO	Minuto		7,35	14,70	22,05
CV da estratégia	2,68%	Potência máxima em cada gerador c/ bateria				
		G1	G2	G3	G4	
		991,24	0,00	0,00	0,00	
MÉDIA SIMPLES	Consumo total com Bateria [L]	Consumo total sem Bateria [L]	Diferença de consumos [L]	BATERIA		
	194,14	277,71	83,58	100 kWh	200 kWh	300 kWh
			30,09%	400 kWh	500 kWh	600 kWh
	SOC	Mínimo		63,94%	71,97%	74,65%
	CR	Máximo		8,12	4,06	2,71
	TEMPO	Minuto		7,39	14,79	22,18
CV da estratégia	0,00%	Potência máxima em cada gerador c/ bateria				
		G1	G2	G3	G4	
		975,73	0,00	0,00	0,00	

Tabela 16: Coeficientes de Variação para as diferentes estratégias adotadas na operação ROV4YA.

Coeficiente de variação					
DMS	MM50	MM100	MM250	MM500	MM1000
0,00%	8,27%	6,33%	3,90%	2,87%	2,68%

Tabela 17: Médias das potências dos motores para as diferentes estratégias adotadas na operação ROV4YA.

Média das Potências dos motores					
DMS	MM50	MM100	MM250	MM500	MM1000
975,73	974,17	971,57	966,28	962,41	958,37

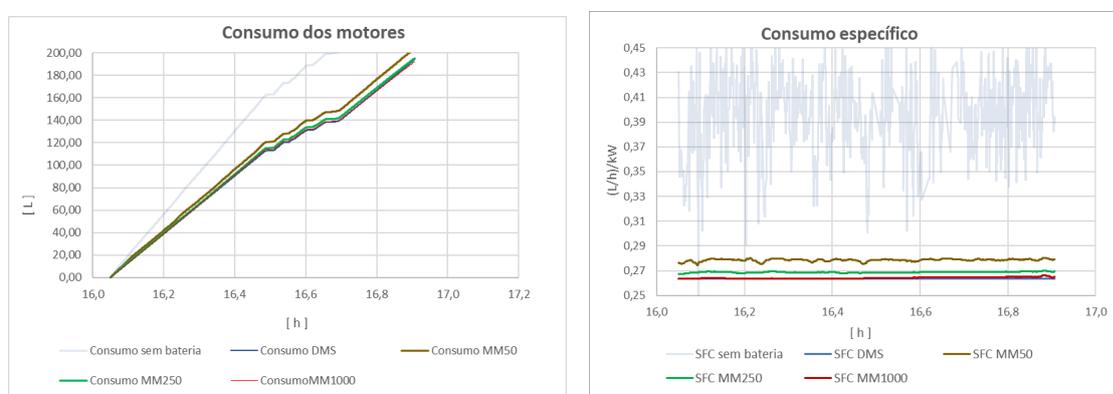


Figura 101: Consumo em Litros e consumo específico para as estratégias DMS, MM50, MM250, MM1000, adotadas na operação ROV4YA.

Há de se ressaltar, como visto na , que, para as outras estratégias com média móvel abaixo de 1000s, incluindo a MM500, houve a extrapolação do valor de potência do motor, de acordo com o limite estabelecido no simulador, de 1000kW, o que inviabilizaria a aplicação destas estratégias.

5.6.2

STD2YA 4 horas

Nesta simulação, foram analisadas as influências das estratégias na operação STD2YA com o navio operando em DP com dois motores durante 3,95 horas. Nesta operação, os motores funcionaram com potência média de 382kW para o G1 e 375kW para o G3, e o CV da operação é 6,89%. A Tabela 18 mostra todos os resultados alcançados para as estratégias com a utilização de um motor operando em conjunto com a bateria. Neste caso, observa-se que não houve restrição no uso de nenhuma das baterias e em nenhum caso, o motor excedeu o limite de potência de 1000kW. A melhor estratégia, neste caso, foi a DMS com redução de 127,20 litros, equivalendo a 13,67%.

Tabela 18: Dados de saída par as diferentes estratégias adotadas para a simulação com hibridização para uma operação em STD2YA.

OPERAÇÃO		Stand by 2 Y A		CV	6,89%	PERÍODO	3,955	Horas						
DADOS MIM 50	Consumo total com Bateria [L]		Consumo total sem Bateria [L]		Diferença de consumos [L]		BATERIA							
	827,63		930,39		102,76		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh		
					11,04%		SOC	Mínimo	79,04%	79,52%	79,68%	79,76%	79,81%	79,84%
							CR	Máximo	2,09	1,04	0,70	0,52	0,42	0,35
							TEMPO	Minuto	28,73	57,45	86,18	114,91	143,63	172,36
							CV da estratégia	Potência máxima em cada gerador c/ bateria						
								G1	G2	G3	G4			
								905,60	0,00	0,00	0,00			
	DADOS MIM 100	Consumo total com Bateria [L]		Consumo total sem Bateria [L]		Diferença de consumos [L]		BATERIA						
		827,72		930,39		102,66		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh	
				11,03%		SOC	Mínimo	78,11%	79,06%	79,37%	79,53%	79,62%	79,69%	
						CR	Máximo	1,98	0,99	0,66	0,50	0,40	0,33	
						TEMPO	Minuto	30,27	60,53	90,80	121,07	151,34	181,60	
						CV da estratégia	Potência máxima em cada gerador c/ bateria							
							G1	G2	G3	G4				
							900,50	0,00	0,00	0,00				
DADOS MIM 250		Consumo total com Bateria [L]		Consumo total sem Bateria [L]		Diferença de consumos [L]		BATERIA						
		828,26		930,39		102,12		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh	
					10,98%		SOC	Mínimo	76,31%	78,16%	78,77%	79,08%	79,26%	79,39%
							CR	Máximo	2,02	1,01	0,67	0,50	0,40	0,34
							TEMPO	Minuto	29,77	59,55	89,32	119,09	148,87	178,64
							CV da estratégia	Potência máxima em cada gerador c/ bateria						
								G1	G2	G3	G4			
								900,50	0,00	0,00	0,00			
	DADOS MIM 500	Consumo total com Bateria [L]		Consumo total sem Bateria [L]		Diferença de consumos [L]		BATERIA						
		823,33		930,39		107,06		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh	
				11,51%		SOC	Mínimo	75,27%	77,64%	78,42%	78,82%	79,05%	79,21%	
						CR	Máximo	1,98	0,99	0,66	0,50	0,40	0,33	
						TEMPO	Minuto	30,25	60,49	90,74	120,99	151,24	181,48	
						CV da estratégia	Potência máxima em cada gerador c/ bateria							
							G1	G2	G3	G4				
							900,50	0,00	0,00	0,00				
DADOS MIM 1000		Consumo total com Bateria [L]		Consumo total sem Bateria [L]		Diferença de consumos [L]		BATERIA						
		825,36		930,39		105,02		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh	
					11,29%		SOC	Mínimo	75,52%	77,76%	78,51%	78,88%	79,10%	79,25%
							CR	Máximo	2,11	1,05	0,70	0,53	0,42	0,35
							TEMPO	Minuto	28,46	56,93	85,39	113,86	142,32	170,78
							CV da estratégia	Potência máxima em cada gerador c/ bateria						
								G1	G2	G3	G4			
								900,50	0,00	0,00	0,00			
	MÉDIA SIMPLES	Consumo total com Bateria [L]		Consumo total sem Bateria [L]		Diferença de consumos [L]		BATERIA						
		803,18		930,39		127,20		100 kWh	200 kWh	300 kWh	400 kWh	500 kWh	600 kWh	
				13,67%		SOC	Mínimo	61,19%	70,59%	73,73%	75,30%	76,24%	76,86%	
						CR	Máximo	2,53	1,27	0,84	0,63	0,51	0,42	
						TEMPO	Minuto	23,68	47,36	71,05	94,73	118,41	142,09	
						CV da estratégia	Potência máxima em cada gerador c/ bateria							
							G1	G2	G3	G4				
							757,21	0,00	0,00	0,00				

O gráfico da Figura 102 mostra a variação da potência no motor nas estratégias MM50, MM250 e MM1000, além da DMS e da operação dos motores na situação real. É notório que, quanto menor a média móvel, mais transiente é o comportamento do motor, assemelhando-se desta forma, cada vez mais, ao comportamento do SGE na situação sem bateria, mostrado na projeção em cinza claro no gráfico. Isto leva a uma situação de maior transiência nos motores, o que, por consequência, aumenta o consumo.

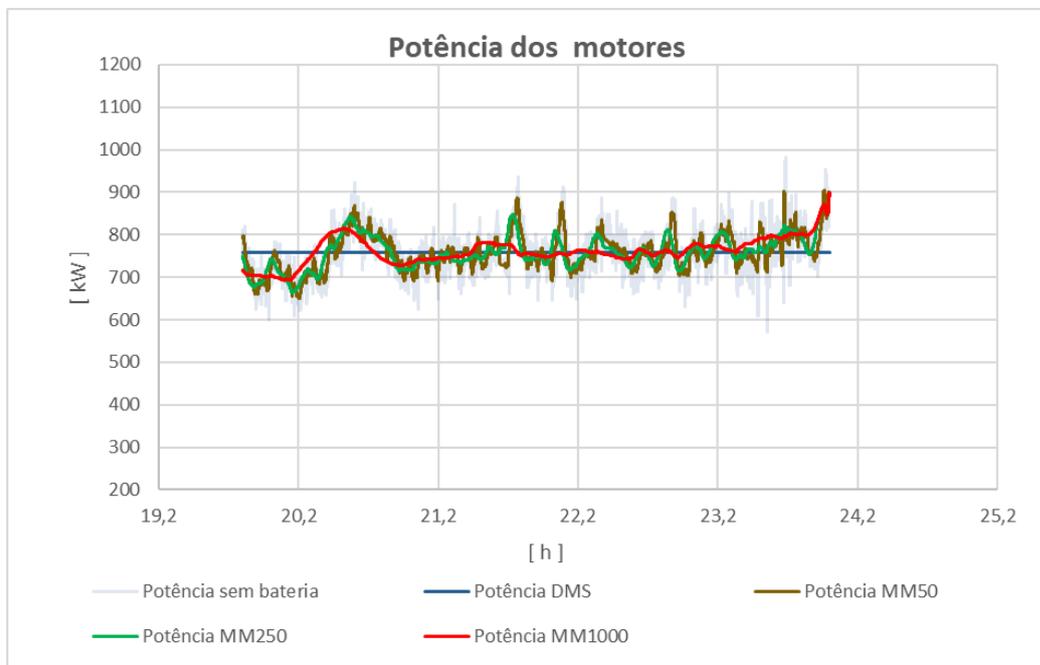


Figura 102: Comparação do comportamento do SGE sem a bateria e com as estratégias DMS, MM50, MM250 e MM1000 para a operação STD2YA.

A Tabela 19 mostra todos os valores dos CV encontrados para cada simulação. Percebe-se aqui, que, comparados com os valores do primeiro caso, visto no tópico 5.6.1, os CVs foram maiores para cada estratégia. Isto acarreta uma maior diferença entre os valores de consumo na simulação com DMS, sem a penalização, para as outras estratégias, quando comparado com o caso anterior. A influência da penalização, neste caso foi, portanto, maior. Já a Tabela 20 mostra a média da potência em cada uma das estratégias. Elas se encontram próximas, o que, como visto pelo gráfico da Figura 60, evidencia um valor de consumo específico semelhantes para todas as estratégias, sendo este um fator que não tem tanto impacto para esta simulação. Logo, neste caso, o fator de maior influência foi o CV e, consequentemente, a penalização pela transiência.

Tabela 19: Coeficientes de Variação para as diferentes estratégias adotadas na operação STD2YA.

Coeficiente de variação					
DMS	MM50	MM100	MM250	MM500	MM1000
0,00%	5,89%	5,64%	5,21%	4,73%	4,19%

Tabela 20: Médias das potências dos motores para as diferentes estratégias adotadas na operação STD2YA.

Média das Potências dos motores					
DMS	MM50	MM100	MM250	MM500	MM1000
757,21	757,36	757,46	758,02	759,19	761,24

Os gráficos da Figura 103 mostram as faixas de consumo em litros e consumo específico, respectivamente, para diferentes estratégias, contribuindo para elucidar que a estratégia DMS (em azul nos dois gráficos) foi a mais eficiente nesta operação.

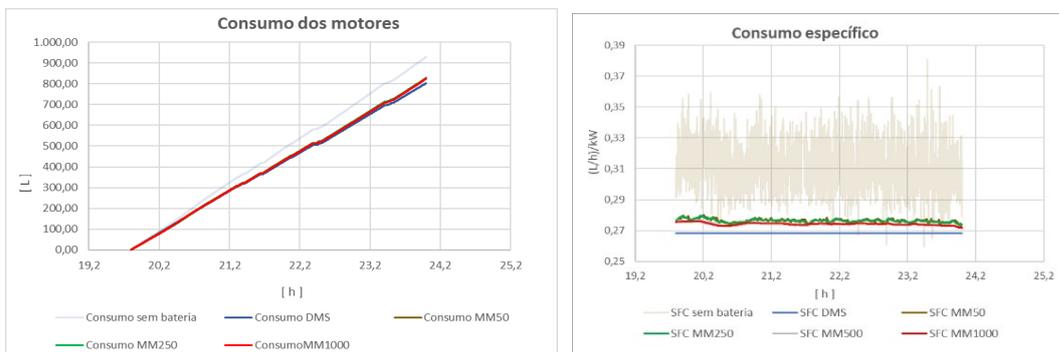


Figura 103: Consumo em Litros e consumo específico para as estratégias DMS, MM50, MM250, MM1000, adotadas na operação STD2YA.

5.7

Análise do estudo de caso com mês típico

Nesta etapa, pretende-se simular um mês típico de operação do navio, baseado no levantamento das operações reais e no perfil mensal de operação encontrado para a embarcação. Através desta análise, tem-se o objetivo principal de verificar a redução de consumo da embarcação, na hipótese da instalação do sistema hibridizado, mantendo o perfil de operação vigente no período de análise.

5.7.1

Definição do Mês Característico

Como já visto no tópico 4.3.2, as operações do navio foram coletadas, sendo criados painéis demonstrativos dos tipos de operação e percentual delas durante cada mês avaliado. A fim de definir a operação de um mês característico, foram levantados os dados de operação do navio contendo o tipo de operação e sua duração, considerando todos os dias dos meses em que houve a coleta dos dados. Dentre os meses avaliados, escolheu-se o de agosto de 2020 como mês típico, por ter um perfil de operação próximo ao global de operação do navio entre os meses de julho dezembro de 2020, como visto na Figura 104 e Figura 105, respectivamente. Além disso, a maioria dos dias coletados para o processamento dos dados pertenciam ao mês de agosto, fator que colaborou na escolha deste mês.

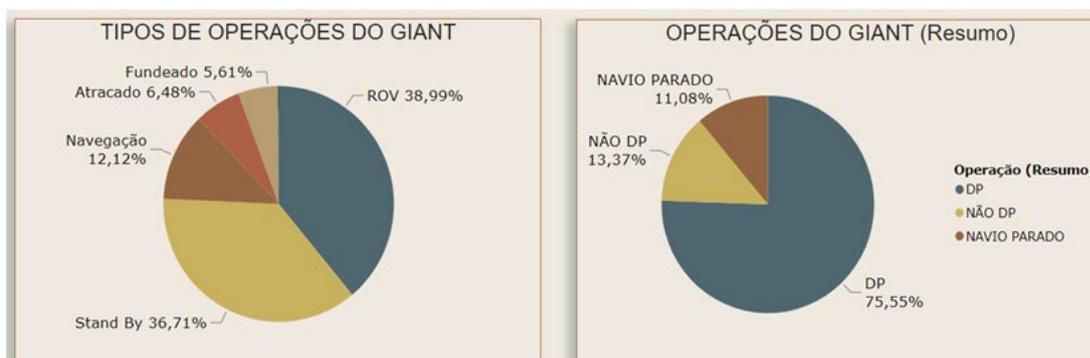


Figura 104: Percentual de operação do NAVIO em agosto 2020.



Figura 105: Percentual de operação do NAVIO em 2020 (julho a dezembro).

A Tabela 21 contém todas as operações coletadas para o mês de agosto de 2020, incluindo data, tipo de operação e duração das operações. Observa-se que as operações denominadas “Fundeado” e “Atracado” foram consideradas com o mesmo perfil da operação de Porto.

Tabela 21: Operações coletadas para o mês de agosto de 2020.

DATA	DURAÇÃO	OPERAÇÃO	HORA EM DECIMAL
01/08/2020	20:56:23	ROVS4Aberto	20,9397
01/08/2020	02:59:29	Stand ByS2Fechado	2,9914
02/08/2020	07:17:37	ROVS4Aberto	7,2936
02/08/2020	00:22:11	ROVS4Aberto	0,3697
02/08/2020	01:12:36	NavegaçãoN2Fechado	1,2100
02/08/2020	08:52:24	Stand byS2Fechado	8,8733
02/08/2020	06:05:01	ROVS4Aberto	6,0836
03/08/2020	10:57:26	NavegaçãoN2Fechado	10,9572
03/08/2020	12:58:26	ROVS4Aberto	12,9739
04/08/2020	04:34:16	FundeadoN1Fechado	4,5711
04/08/2020	00:58:29	NavegaçãoN4Aberto	0,9747
04/08/2020	00:22:11	AtracadoN4Aberto	0,3697
04/08/2020	06:17:07	FundeadoN1Fechado	6,2853
04/08/2020	01:38:49	NavegaçãoN4Aberto	1,6469
04/08/2020	09:58:57	NavegaçãoN2Fechado	9,9825
05/08/2020	03:57:58	NavegaçãoN2Fechado	3,9661
05/08/2020	05:14:36	Stand ByS2Fechado	5,2433
05/08/2020	01:26:43	FundeadoN1Fechado	1,4453
05/08/2020	02:13:06	Stand ByS2Fechado	2,2183
05/08/2020	10:57:26	FundeadoN1Fechado	10,9572
06/08/2020	07:13:35	ROVS4Aberto	7,2264
06/08/2020	00:42:21	Stand byS2Aberto	0,7058
06/08/2020	15:57:55	NavegaçãoN2Fechado	15,9653
07/08/2020	03:41:50	Stand ByS2Fechado	3,6972
07/08/2020	20:14:02	ROVS4Aberto	20,2339
08/08/2020	08:38:17	ROVS4Aberto	8,6381
08/08/2020	15:17:35	Stand ByS2Fechado	15,2931
09/08/2020	11:47:51	ROVS4Aberto	11,7975
09/08/2020	11:57:56	Stand byS2Fechado	11,9656
09/08/2020	00:08:04	ROVS4Aberto	0,1344
10/08/2020	23:57:53	ROVS4Aberto	23,9647
11/08/2020	07:23:40	ROVS4Aberto	7,3944
11/08/2020	01:46:53	Stand byS2Fechado	1,7814
11/08/2020	14:43:18	ROVS4Aberto	14,7217
12/08/2020	23:57:53	ROVS4Aberto	23,9647
13/08/2020	23:57:53	Stand ByS2Aberto	23,9647
14/08/2020	23:57:53	Stand ByS2Aberto	23,9647
15/08/2020	23:57:53	Stand ByS2Aberto	23,9647
16/08/2020	20:58:24	ROVS4Aberto	20,9733
16/08/2020	02:57:28	Stand ByS2Aberto	2,9578
17/08/2020	07:35:46	ROVS4Aberto	7,5961
17/08/2020	07:09:33	Stand byS2Aberto	7,1592
17/08/2020	09:08:32	ROVS4Aberto	9,1422
18/08/2020	07:37:47	ROVS4Aberto	7,6297
18/08/2020	13:18:36	Stand byS2Aberto	13,3100
18/08/2020	02:57:28	ROVS4Aberto	2,9578
19/08/2020	14:58:39	ROVS4Aberto	14,9775
19/08/2020	00:58:29	Stand byS2Aberto	0,9747
19/08/2020	00:52:26	NavegaçãoN2Aberto	0,8739
19/08/2020	00:18:09	Stand byS2Aberto	0,3025
19/08/2020	06:43:20	ROVS4Aberto	6,7222
20/08/2020	23:56:50	ROVS4Aberto	23,9472
21/08/2020	23:57:53	Stand byS2Aberto	23,9647
22/08/2020	08:26:11	NavegaçãoN2Aberto	8,4364
22/08/2020	15:29:41	Stand byS2Aberto	15,4947
23/08/2020	13:10:32	FundeadoN1Fechado	13,1756
23/08/2020	01:00:30	NavegaçãoN4Aberto	1,0083
23/08/2020	09:42:49	NavegaçãoN2Aberto	9,7136
24/08/2020	18:21:06	FundeadoN1Fechado	18,3517
24/08/2020	01:32:46	NavegaçãoN4Aberto	1,5461
24/08/2020	03:59:59	FundeadoN1Fechado	3,9997
25/08/2020	00:54:27	NavegaçãoN4Aberto	0,9075
25/08/2020	23:01:25	FundeadoN1Fechado	23,0236
26/08/2020	04:12:05	Stand ByS2Aberto	4,2014
26/08/2020	19:23:37	NavegaçãoN2Aberto	19,3936
26/08/2020	00:20:10	NavegaçãoN4Aberto	0,3361
27/08/2020	23:57:53	Stand ByS2Aberto	23,9647
28/08/2020	23:57:53	Stand ByS2Aberto	23,9647
29/08/2020	23:57:53	Stand ByS2Aberto	23,9647
30/08/2020	08:28:12	ROVS4Aberto	8,4700
30/08/2020	15:27:40	Stand ByS2Aberto	15,4611
31/08/2020	02:57:28	NavegaçãoN2Aberto	2,9578
31/08/2020	20:58:24	ROVS4Aberto	20,9733

Para se chegar ao valor total do mês para a simulação com a hibridização, foram feitas simulações de cada umas das operações contidas na tabela da Figura 59. Como já explicado no tópico 4.3.2, estes intervalos foram criados para se obter mais variedade das operações lançadas no simulador. Por exemplo, como visto na tabela da Figura 59, para a operação ROV, há 4 intervalos no dia 25 de julho, e mais 3 no dia 10 de agosto, totalizando 7 intervalos para esta operação, todos com período de cerca de uma hora. Para cada um destes intervalos, foi feita a simulação da hibridização e obteve-se o melhor resultado para redução de consumo dentre todas as estratégias citadas neste trabalho, para cada uma das simulações. Feito isso, tem-se os dados da Tabela 21, contendo todas as operações dos meses e suas respectivas durações. Observando-se um exemplo na Tabela 21 com o primeiro dia do mês (01 de agosto), percebe-se que a operação ROV durou 21 horas. Como tem-se 7 operações simuladas, faz-se a divisão do tempo total da operação pela quantidade simulada como visto na eq. (20)

Neste caso específico, tem-se:

$$\text{Período da operação} = \frac{\text{Tempo total da operação}}{n^{\circ} \text{ de operações simuladas}} \quad (20)$$

$$\text{Período da operação} = \frac{21}{7} = 3 \text{ horas}$$

Logo, neste dia, para as operações em ROV, deve ser lançado cada uma das simulações com o tempo de 3 horas.

A Tabela 22 contém os dados da simulação, já com as novas divisões. Nela, observam-se os seguintes dados, da esquerda para a direita:

- Data: dia simulado no mês típico;
- Operação: tipo de operação;
- Dif de consumo: diferença de consumo obtida com a melhor estratégia de simulação utilizada;
- Tempo medido: tempo medido na simulação realizada de acordo com os dados da Figura 59;
- Consumo do período sem bateria: consumo real da operação realizada no dia, considerando o tempo medido na simulação;
- Nº de motores funcionado com a bateria, sem a bateria e a diferença numérica entre as duas situações: esta informação é importante para se calcular a redução do tempo de máquina;
- Redução do tempo de máquina: redução em horas do tempo de utilização total dos motores entre a operação sem a hibridização e com a hibridização;
- Estratégia: melhor estratégia utilizada na simulação;
- Tempo de operação: tempo em horas a ser considerado para a operação após a divisão realizada de acordo com a eq. (20) ;
- Redução do consumo no intervalo: redução total de combustível calculada para o intervalo de operação de acordo com o tempo calculado na eq. (20)
- Consumo total sem a bateria: consumo total do SGE na condição sem a hibridização para o intervalo de tempo calculado na eq. (20).

Tabela 22: Avaliação do dia 01 de agosto na comparação dos consumos com e sem a aplicação da hibridização.

DATA	Operação	Dif de consumo [L]	Tempo medido [h]	Consumo do período sem bateria [L]	Nº motores sem bateria	Nº motores com bateria	Dif nº e motores	Redução do tempo de máquina [h]	Estratégia	Tempo da operação [h]	Redução do consumo no intervalo [L]	Consumo total sem bateria [L]
01/ago	ROV54Aberto	93,290	0,859	316,437	4	1	3	10,48	DMS	3,00	325,809	1105,135
	ROV54Aberto	112,016	0,973	348,247	4	1	3	9,25	M1000	3,00	345,373	1073,732
	ROV54Aberto	102,850	0,883	310,811	4	1	3	10,19	DMS	3,00	349,412	1055,918
	ROV54Aberto	117,620	1,020	357,918	4	1	3	8,82	DMS	3,00	345,941	1052,699
	ROV54Aberto	73,710	0,601	206,761	4	1	3	14,98	M500	3,00	368,041	1032,369
	ROV54Aberto	125,665	1,052	363,290	4	1	3	8,56	DMS	3,00	358,379	1036,053
	ROV54Aberto	84,359	0,702	244,661	4	1	3	12,82	M1000	3,00	360,393	1045,227
	Std2Fechado	26,138	0,927	223,197	2	1	1	1,62	M1000	1,50	42,297	361,182
	Std2Fechado	24,778	0,874	207,613	2	1	1	1,72	M1000	1,50	42,526	356,315

Para entender melhor como cada uma das colunas na planilha do Excel da Tabela 22 foi calculada, retira-se um extrato de uma das simulações realizadas. No exemplo, mais especificamente, uma simulação para a operação ROV4YA, tem-se o seguinte resultado, visto na Tabela 23.

Tabela 23: Dados de saída para uma das 7 simulações utilizadas para o mês típico na operação ROV4YA.

OPERAÇÃO 2		ROV 4 YA		PERÍODO		0,973		Horas					
DADOS M.M.1000	Consumo total com Bateria [L]		Consumo total sem Bateria [L]		Diferença de consumo [L]								
	236,23		348,25		112,02								
					32,17%								
		BATERIA											
		100 kWh		200 kWh		300 kWh		400 kWh		500 kWh		600 kWh	
SOC	Mínimo	72,16%		76,08%		77,35%		78,04%		78,43%		78,69%	
CR	Máximo	9,13		4,57		3,04		2,28		1,83		1,52	
TEMPO	Minuto	6,57		13,14		19,71		26,28		32,85		39,42	
		Potência máxima em cada gerador c/ bateria											
		G1		G2		G3		G4					
		932,75		0,00		0,00		0,00					

Neste exemplo, o tempo medido para a operação foi de 0,973 horas. Para se calcular o quantitativo em litros que foi economizado com a simulação, é realizada a seguinte operação, de acordo com a eq. (21)

$$\text{Reduc de consumo no período} = \text{Dif. de consumo} * \frac{\text{Tempo de operação}}{\text{Tempo medido no simulador}} \quad (21)$$

Em que:

- Reduc de consumo no período: diferença entre o consumo, no período considerado na planilha do mês característico, entre a operação com e sem a bateria;
- Tempo medido no simulador: intervalo de tempo da operação em que cada simulação foi considerada;
- Dif. De consumo: diferença de consumo encontrada na simulação para o tempo medido no simulador;
- Tempo de operação: período da operação que vai ser alimentado na planilha do mês típico de operação, ou seja, o tempo que será preenchido na planilha de mês característico.

Neste caso, tem-se:

$$\text{Redução de consumo no período} = 112,02 \text{ Litros} * \frac{2,99 \text{ h}}{0,973 \text{ h}} = 344,23 \text{ Litros}$$

Outros dados também são computados nesta avaliação, sendo o valor do consumo total dos motores sem a hibridização (consumo real) e a redução de tempo de máquina

devido ao uso da hibridização. Os cálculos deles são realizados pela eq. (22) e eq.(23) vistas a seguir:

Cons total s/em bateria

$$= \text{Cons. do período s/em bateria} * \frac{\text{Tempo de operação}}{\text{Tempo medido no simulador}} \quad (22)$$

- Cons total s/ motores: consumo dos motores, sem o uso da bateria, no período considerado na planilha do mês característico;
- Cons. do período s/a bateria: consumo computado no simulador referente à operação sem o uso da hibridização. Ele é calculado considerando o tempo em que cada simulação foi realizada.

Redução do tempo de máquina

$$= \text{Dif. do nº de motores} * \frac{\text{Tempo de operação}}{\text{Tempo medido no simulador}} \quad (23)$$

- Reduc do tempo de máquina: redução total, para cada operação considerada no mês típico, devido à redução do uso dos motores quando aplicada a hibridização;
- Dif. do nº de motores: diferença por operação entre o número de motores utilizados na operação real e na simulada com a hibridização.

A seguintes considerações devem ser feitas com relação a esta simulação:

- a) Para a operação de porto e similares, o método para o cálculo da diferença de consumo é o mesmo abordado na simulação realizada na primeira parte deste tópico, ou seja a operação Start/Stop, no tópico 5.5.5;
- b) Ao final de cada simulação feita, num determinado intervalo de operação, a bateria não necessariamente finalizava o seu trabalho com o SOC de 80%. No entanto, para que a simulação seguinte inicie, a bateria deve estar com o SOC de 80%, ou seja, o valor final da quantidade de energia da bateria deve ser o mesmo do valor inicial na simulação. O gráfico da Figura 106 mostra um exemplo da variação da energia da bateria num intervalo de simulação. Observa-se que, inicialmente, ela possui carga definida como 0kWh, mas, ao final da operação, ela possui carga negativa de -8,71kWh. Este gráfico não mostra a carga real da bateria, apenas a variação em relação ao seu estado inicial na simulação. Esta diferença de carga na bateria é considerada, pois, como já dito, deve ser reposta para iniciar a simulação seguinte, de maneira a se obter, de forma mais realista, o valor do consumo do motor necessário para recarregar esta diferença de energia da bateria e também o tempo de uso do motor para esta operação. No exemplo do gráfico da Figura 106, pretende-se encontrar a diferença de energia entre o início e fim da operação. Desta forma, considera-se que a carga inicial é zero e a final, caso seja negativa é, em módulo, a necessidade de reposição de energia dada em kWh:

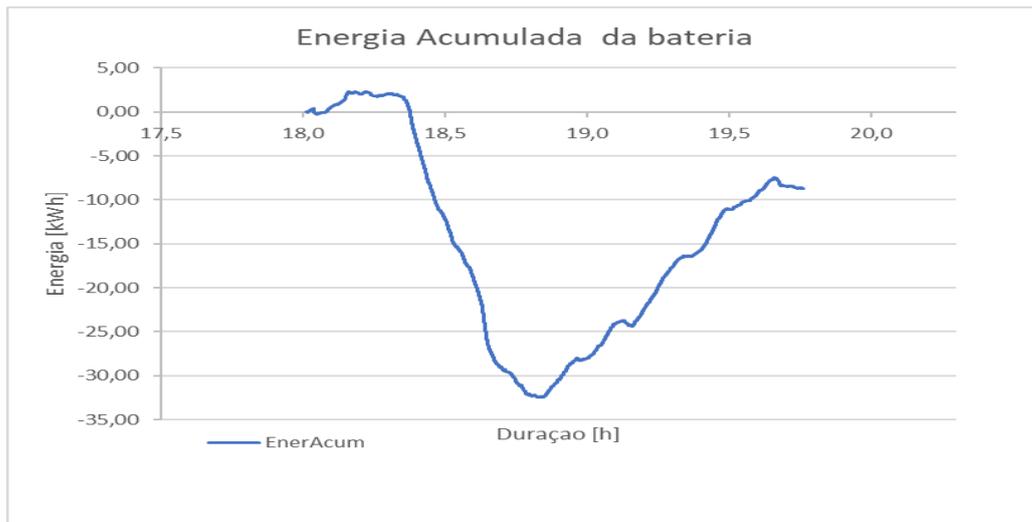


Figura 106: Gráfico da variação da quantidade de energia na bateria no período analisado.

Para a simulação do exemplo da Figura 106, coletou-se os seguintes dados, necessários para os cálculos, como será explicado a seguir:

- SFC médio da operação= 0,27 (L/h)/kW
- Potência média do motor com a hibridização = 705,60 kW

Para o cálculo do consumo necessário para repor esta energia à bateria, utiliza-se a eq. (24)

$$\text{Consumo para regarga [L]} = \text{Energia acumulada[kWh]} * \text{SFC médio} \left[\frac{\text{L}}{\text{kWh}} \right] \quad (24)$$

Neste caso:

$$\text{Consumo para regarga [L]} = 8,71[\text{kWh}] * 0,27 \left[\frac{\text{L}}{\text{kWh}} \right] = 2,37 \text{ Litros}$$

Já para o caso do tempo necessário para repor esta energia à bateria procede-se da seguinte forma, de acordo com a eq. (25)

$$\text{Tempo para regarga [h]} = \frac{\text{Energia acumulada[kWh]}}{\text{Potência média do motor com hibridização[kW]}} \quad (25)$$

Que, neste caso, é igual a:

$$\text{Tempo para regarga [L]} = \frac{8,71[\text{kWh}]}{705,60[\text{kW}]} = 0,012 \text{ h}$$

Este procedimento foi adotado em todos os casos, sendo o consumo e o tempo acrescentado à operação no mês típico. Para aquelas operações em que o valor de consumo real foi menor que o simulado, como por exemplo a operação NAVEG2NA que foi simulada na primeira parte deste tópico, foi entendido que a contribuição na redução seria zero, assim como a redução do tempo de máquina.

Fazendo esta operação para todos os dias do mês característico, obteve-se, por fim, o seguinte resultado para a reduções do consumo e tempo de máquina para um mês de operação do navio:

- Redução total do tempo de máquina em um mês: 1600,71 horas;
- Redução total do consumo de combustível em um mês: 45701,82 litros;
- Redução percentual do consumo de combustível em um mês: 22,58%.

Multiplicando estes valores por 12 meses, tem-se os resultados para um ano de operação da embarcação com o uso da hibridização, logo, a redução anual para a simulação é então de:

Redução anual de tempo de máquina = 19.208,52 horas/ano

Redução total de consumo anual = 548.421,84 Litros/ano

Por fim, para saber o tempo em que um suposto investimento na instalação do sistema de hibridização passaria a dar resultados financeiros positivo, utiliza-se o método de análise do valor presente líquido em que se deve comparar o valor inicial do investimento e as reduções de custo mensais causadas pela economia tanto de redução de consumo quanto de manutenção dos motores causados pela redução de tempo de máquina. Estes valores de redução são trazidos para o valor presente líquido (VPL) pela fórmula da eq. (26) .[87]

$$VPL = \frac{V.SIMPLES}{(1 + I)^t} \quad (26)$$

Em que:

- VPL é o valor presente líquido, neste caso, da redução do custo de manutenção e consumo mensal;
- V.Simples é o valor no ano t da redução dos custos de consumo e manutenção;
- I é a taxa de rentabilidade;
- t é o período medido em anos em que cada parcela é lançada.

Para calcular a economia causada pela redução do consumo, multiplica-se o valor da diferença de consumo anual alcançada pela hibridização pelo custo do litro de óleo combustível. Os valores referentes ao custo litro do óleo combustível, bem como o custo de manutenção dos motores por hora de máquina e, por fim, o custo da instalação do sistema de hibridização foram fornecidos por empresas do ramo à equipe da PUC-Rio responsável por este projeto. Logo, para este estudo foi considerado que:

Custo do litro do óleo combustível = R\$5,00/litro.

Desta forma, o valor anual da redução de consumo é: 548.421,84 litros/ano * R\$5,00/Litro = R\$2.742.109,42/ano, ou seja, dois milhões, setecentos e quarenta e dois mil, cento e nove reais e quarenta e dois centavos. Considera-se também o custo de manutenção em 1 real por hora de máquina, logo, a parcela da redução do valor gasto com manutenção anual dos motores é de 19.208,52 horas * R\$1/hora = R\$19.208,23 (dezenove mil, duzentos e oito reais e vinte e três centavos).

Somando-se as duas parcelas referentes ao custo da redução de consumo e de manutenção dos motores, tem-se a redução de gastos anuais total atrelada ao sistema de hibridização, no valor de R\$2.761.317,43/ano (dois milhões, setecentos e sessenta e um mil, trezentos e dezessete reais e quarenta e três centavos por ano). Para o cálculo do valor

presente, foram utilizados os seguintes valores para a taxa de rentabilidade e também para o custo do investimento de aquisição do sistema de hibridização:

1. Taxa de rentabilidade (SELIC- agosto de 2023)[88] =13,25%;
2. Valor da aquisição e instalação do sistema= R\$ 10.000.000,00.

A Tabela 24 mostra a evolução dos valores da análise de viabilidade financeira do projeto. Neste caso, o valor acumulado dos investimentos e o retorno financeiro passam a se tornar positivos a partir do sexto ano após o início da sua operação. Considerando a vida útil do sistema de 10 anos [89],[90],[91], ao final deste período, tem-se em valor presente, um montante acumulado referente à economia esperada pela redução de custos de R\$4.688.878,96 (quatro milhões, seiscentos e oitenta e oito mil, oitocentos e setenta e oito reais e noventa e seis centavos).

Tabela 24: Simulação da análise financeira da instalação do sistema hibridizado.

Análise de viabilidade financeira do projeto do simulador											
ANO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V SIMPLES [R\$]	- 10.000.000	2.761.318	2.761.318	2.761.318	2.761.318	2.761.318	2.761.318	2.761.318	2.761.318	2.761.318	2.761.318
VPL [R\$]	- 10.000.000	2.432.879	2.143.506	1.888.552	1.663.922	1.466.011	1.291.639	1.138.008	1.002.650	883.392	778.319
ACUM [R\$]	- 10.000.000	- 7.567.121	- 5.423.615	- 3.535.063	- 1.871.141	- 405.131	886.509	2.024.517	3.027.167	3.910.560	4.688.879

CONCLUSÃO

No contexto atual das relações comerciais globais e seus impactos ao meio ambiente, a navegação tem bastante relevância como atividade industrial, sendo a sua aplicação na indústria de exploração e produção de petróleo, uma delas. Visando reduzir os impactos ambientais gerados por este tipo de atividade, diferentes alternativas para a geração de energia mais limpa foram desenvolvidas ao longo do tempo. Destaca-se dentre elas a hibridização com armazenamento de energia, tecnologia já difundida na indústria automotiva, mas que carece de mais estudos para a aplicação em embarcações. Esta tecnologia tem por característica o uso de bancos de baterias ou outros acumuladores de energia que auxiliam na gestão do sistema primário de geração de energia, permitindo que o mesmo opere sempre ou quase sempre nas suas condições ótimas, visando reduzir, principalmente, o consumo e consequente emissões dos motores. Neste trabalho, a aplicação desta solução de hibridização foi avaliada em um navio de suporte a plataformas.

Para se tirar proveito da hibridização, foi realizado um estudo das características, tanto do sistema de geração de energia, avaliando as principais características de um MCI, quanto dos diferentes aspectos relacionados a bateria. Para o MCI, avaliou-se o seu comportamento relacionando potência e consumo, ficando claro que existe uma faixa ótima de operação para o motor em que o seu consumo e, conseqüentemente, nível de emissão é otimizado. Já para as baterias, algumas características de interesse foram estudadas como a relação do SOC da bateria com a sua vida útil, a análise do CR que está relacionado com a capacidade de potência entregue pela bateria, dentre outras. Analisou-se também algumas das diversas estratégias de utilização do sistema hibridizado.

Após os estudos iniciais, procedeu-se com a análise da embarcação, objeto deste projeto. A fim de aplicar tal solução tecnológica numa embarcação de suporte a plataformas, foram coletados dados de operação desta embarcação entre os meses de junho a dezembro de 2020. Os dados continham informações sobre os diferentes tipos de operações realizadas pelo navio, além dos valores de potência e consumo do SGE em cada uma das operações. Os dados aquistados foram tratados na ferramenta *Power Query*, onde foram enfrentadas algumas dificuldades devido à problemas no processamento dos dados. Nesta primeira análise, foi observado no perfil de operação do navio que, na maior parte do tempo, ele realizava operação em Posicionamento Dinâmico, equivalendo a 68,08% do tempo de operação. Já para as operações de navegação o percentual foi de 20,47% e em 11,45% do tempo, o navio esteve parado no porto ou ancorado. Estes dados referem-se ao acumulado das operações analisadas entre julho e dezembro de 2020. Estes dados iniciais sugeriu a possibilidade de redução considerável do consumo com o uso da tecnologia hibridizada, uma vez que mais de dois terços (2/3) das operações ocorreram com realização de DP, sendo esta a operação em que o SGE funciona de forma mais transiente e, portanto, com maior possibilidade de ser otimizada com a utilização do banco de baterias.

Outra característica levantada foi a relação das operações com o Coeficiente de Variação da potência dos motores. Observou-se que, quanto mais transiente, maior o CV da operação, sendo este o parâmetro utilizado no trabalho para a análise da magnitude de transiência da geração de energia pelo SGE. As operações com menor CV foram as de navegação em que os valores variaram em torno de 3%, seguidas das operações de porto, com valor um pouco maior que o anterior, superiores a 4% e, por fim, as em DP com valores mais elevados, chegando a CV de 14,38%. Posteriormente, o CV serviu como base para a definição da penalização do consumo dos motores com relação aos dados de consumo de projeto. Por meio da análise dos dados de um dos motores em diferentes situações de CV,

foi possível estabelecer a relação entre CV e penalização de consumo, com um valor máximo de penalização de 6% em relação aos dados de consumo de bancada dos motores. Estes dados foram inseridos no simulador desenvolvido no programa Excel para obter, dentre outras informações, a diferença entre o consumo real do navio com a sua configuração atual sem o banco de baterias e o consumo simulado com o navio operando com o SGE e o armazenamento de energia.

Após o desenvolvimento do simulador, iniciou-se a avaliação do impacto da hibridização em cada um dos diferentes tipos de operação realizada pelo navio. Para isso, foram escolhidos intervalos representativos com cada uma das operações. Com base no perfil de cada operação, foi escolhida a melhor estratégia simulada para o SGE hibridizado, com a finalidade de compreender o potencial de redução de consumo de combustível.

Para cada uma das operações simuladas foram obtidas as melhores configurações de hibridização levando a maior redução de consumo. Para os dados da operação real ROV41YA coletados durante 4 horas, com o navio operando em DP com 4 motores em funcionamento com o barramento aberto, a melhor estratégia utilizada foi a DMS. Foi obtida uma redução de consumo de 30,71%, além da redução de tempo de máquina de 75,00%, devido ao uso de apenas um motor em comparação aos 4 da operação real. Na operação real, o CV encontrado foi de 13,70%, já na hibridizada, para a estratégia DMS, não houve variação da carga utilizada no motor, sendo 907,78 kW, logo seu CV foi nulo. Já para a operação STD2YA com dados obtidos durante 4 horas, com o navio operando em DP com 2 motores em funcionamento e com o barramento aberto, a melhor estratégia simulada foi a DMS, chegando a uma redução de consumo de 13,53%. Neste caso, foi simulada operação de apenas um motor em conjunto com o banco de baterias, logo a redução do tempo de máquina foi de 50%. Na operação real o valor do CV foi de 6,3% em comparação com CV nulo da operação com hibridização simulada, em que se utilizou um motor com a carga constante de 762,27 kW. Em seguida, foram avaliadas duas situações com a embarcação navegando. Na primeira, a operação NAVEG2NF, o navio estava navegando com dois motores em funcionamento, ambos com cargas médias próximas a 500kW e o barramento fechado. A potência média do período de medição de 3,5 horas foi de 475,22kW com o CV de 2,63%. Para a simulação, a melhor estratégia encontrada foi a MM1000, com um motor operando com a potência média de 981,28kW. Neste caso, houve uma redução de 10,7% no consumo e o CV que antes da hibridização era de 2,63%, passou a 2,51%. Obteve-se também uma redução em 50% do tempo de máquina pela redução de 2 motores para apenas 1 na hibridização. O ganho na eficiência do consumo deu-se principalmente pela mudança do ponto de operação do motor. Na segunda operação avaliada com a embarcação navegando (NAVEG2NA) foram coletados dados durante 4 horas de operação. Neste caso, o navio estava navegando com dois motores com cargas médias de 834kW e 843kW, respectivamente, mantendo o barramento aberto. O CV desta operação foi de 1,63%. Nesta simulação, a hibridização não obteve redução de consumo, devendo-se principalmente ao fato de a operação real ter um valor de CV já bastante baixo, além dos motores estarem operando muito próximo da faixa otimizada para o consumo específico. A última operação avaliada foi a de porto, com o navio operando com apenas 1 motor com carga média de 220,17kW e CV de 6,44%. Neste caso, a estratégia utilizada foi a denominada de Start/Stop em que o SGE deveria manter a bateria sempre entre 80% e 20% de seu SOC. Para carregar a bateria, um motor funcionaria na potência ótima de 815kW, sendo desligado após alcançar o SOC da bateria de 80% e religado quando a bateria alcançasse 20,00%. Neste caso, o CV da simulação foi nulo, assemelhando-se com a estratégia DMS. A redução do consumo nesta operação foi de 28,31% e o tempo de máquina, ou seja, o tempo em que o motor esteve em operação para carregar as baterias, teve uma redução de 71,00% em relação à operação real.

Ao final desta análise, observou-se que, quanto maiores os valores de CV, na operação sem hibridização, ou seja, quanto mais transientes elas forem, maior é a capacidade de redução de consumo quando aplicada a simulação com a hibridização. No

entanto, para valores de CV mais baixos o efeito da penalidade pela transiência passa ser menos relevante, como nos casos das operações com navegação. Para estas situações, a estratégia que possibilitar a potência média da operação mais próxima da otimizada, neste caso, 815kW, terá mais efeito na redução de consumo. Observa-se que, se a operação real já tiver sido realizada com potências médias dos motores próximas da otimizada, o efeito da hibridização será irrisório.

Para a segunda análise, visando verificar mais a fundo o comportamento das diferentes estratégias em uma mesma operação, foram escolhidas as duas operações em que se realizou DP, sendo a primeira para ROV4YA e a segunda, STD2YF. Na primeira simulação (ROV4YA), observou-se que, pela restrição imposta de 1000kW máximos de potência para cada motor na simulação, apenas as estratégias de MM1000 e DMS atenderam este requisito. Dentre as duas, a estratégia MM1000 com CV de 2,68% e potência média do motor de 974,14kW foi a que obteve maior redução de consumo (30,80%), no entanto, com um valor muito próxima da estratégia DMS (30,09%) com potência média de operação de 975,43kW. Como já citado anteriormente, dois fatores exercem influência na análise das estratégias. Primeiramente, a penalização relacionada ao CV da operação hibridizada que afeta de forma mais intensa as estratégias com médias móveis de ordens menores, pois estas possuem um comportamento mais transiente que as estratégias com médias móveis de ordens maiores. O outro fator refere-se à média das potências dos motores na hibridização que, ao se aproximar da faixa de operação otimizada, torna a mesma mais eficiente. Mesmo ultrapassando, durante a simulação, a potência máxima estabelecida para os motores de 1000kW, foram coletados, para efeito de comparação, os resultados para as outras estratégias, sendo: MM50 com CV de 8,27%, potência média dos motores de 958,37kW e redução do consumo de 26,55%; MM100 com CV de 6,33%, potência média dos motores de 962,41kW e redução do consumo de 27,77%; MM250 com CV de 3,90%, potência média dos motores de 966,28kW e redução do consumo de 30,52%; e MM500 com CV de 2,87%, potência média dos motores de 971,57kW e redução do consumo de 30,52%. Observa-se novamente o efeito da redução do consumo com a diminuição do CV e também com a aproximação da potência média para o valor otimizado de 815kW. Ressalta-se novamente que com a diminuição do CV, o efeito da penalidade passa a ser menos relevante, como no caso da operação MM500 que, apesar de ter um CV mais elevado do que a DMS, teve maior redução de consumo por consequência de a potência média do motor estar mais próxima da otimizada. Já na segunda operação (STD2YA), também com posicionamento dinâmico, verificou-se que, primeiramente, não houve nenhuma restrição para as estratégias testadas. Os valores encontrados para as estratégias foram os seguintes: MM50 com CV de 5,89%, potência média dos motores de 757,36kW e redução do consumo de 11,04%; MM100 com CV de 5,64%, potência média dos motores de 757,46kW e redução do consumo de 11,03%; MM250 com CV de 5,21%, potência média dos motores de 758,02kW e redução do consumo de 10,98%; MM500 com CV de 4,73%, potência média dos motores de 759,19kW e redução do consumo de 11,51%; MM1000 com CV de 4,19%, potência média dos motores de 761,24kW e redução do consumo de 11,29%; e DMS com CV nulo, potência média dos motores de 757,21kW e redução do consumo de 13,67%. A melhor estratégia, neste caso, foi a DMS. Notou-se que, no global, os valores de CVs hibridizados foram maiores que na operação anterior, tendo, portanto, maior influência na penalização do consumo das operações. Isto fez com que a redução de consumo fosse consideravelmente maior na estratégia DMS que, por definição não é penalizada, apesar, inclusive, da MM1000 apresentar um valor médio de potência mais próximo da faixa otimizada.

Por fim, foi realizado um estudo de caso para a aplicação da hibridização em um mês típico de operação do navio objeto deste estudo. Após levantamento do perfil de operação da embarcação e aplicação das simulações no mês, foram obtidos os valores de redução de tempo de máquina de 1600,71 horas/mês e redução total de consumo de 45.701 litros/mês, representando uma economia de 22,58% do combustível do navio, considerando os diferentes tipos de operações realizadas neste mês. Desta forma, extrapolando a operação

para os 10 anos da expectativa de vida útil do sistema, verificou-se a viabilidade financeira da aplicação da hibridização. Com uma economia estimada de R\$2.761.317,43/ano atrelada à redução de consumo e de custos de manutenção dos motores, o projeto se paga em 5 anos, apresentando retorno financeiro positivo a partir do 6º ano, com um ganho final de R\$4.688.878,96, ao final dos 10 anos estimados para a vida útil do sistema hibridizado. Este resultado mostra o grande potencial da utilização da hibridização em navios que tem por característica operações com alto nível de transiência, contribuindo para a redução de consumo e, por consequência, para a descarbonização deste seguimento industrial.

6.1

Trabalhos futuros

Como já relatado neste trabalho, houve uma grande dificuldade no tratamento dos dados recebidos pelo navio, o que prejudicou algumas análises pretendidas. No entanto, com os dados que se pôde analisar, verificou-se o comportamento consistente do simulador criado.

A fim de se obter, em análises futuras, um conhecimento mais robusto, podendo desta forma prever de forma mais fidedigna as melhores estratégias para as diferentes operações, algumas ações podem ser tomadas, destacando-se:

- Aquisição de novos dados com maior variedade de dias;
- Identificação de possível influência de outros fatores relacionados à navegação como o valor da Escala de Beaufort, que é uma medida empírica da intensidade dos ventos e influência no mar, relacionada com a dificuldade de navegação;
- Influência das diferentes tripulações na maneira de operar a embarcação; influência da carga transportada pela embarcação nas suas manobras dentre outros;
- Instalação do sistema de hibridização na embarcação para validação do simulador;
- Análise das emissões do navio antes e depois da hibridização;
- Análise da variação da eficiência da bateria ao longo do seu ciclo de vida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 RUDDIMAN, W.F. **The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago**. *Climatic Change* 61, 261–293 (2003). <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.fa>
- 2 TANIMOTO, A. H. D. P. Lindoso, e N. Debortoli, **As emissões antropogênicas pré-revolução industrial afetando o clima do planeta**”, *Anppas*, p. 16, 2008.
- 3 UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE-UNFCCC. **Paris Agreement. 21st Conference of the Parties**, p. 3, 2015. doi: FCCC/CP/2015/L.9.
- 4 RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. **Our World in Data**, 2020 [Online]. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- 5 UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- EPA . Sources of Greenhouse Gas Emissions. Disponível em: <[https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#:~:text=Industry%20\(23%25%20of%202021%20greenhouse,produce%20goods%20from%20raw%20materials](https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#:~:text=Industry%20(23%25%20of%202021%20greenhouse,produce%20goods%20from%20raw%20materials)>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- 6 ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS ONU. Transporte marítimo perfaz mais de 80% do comércio global. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2020/09/1727312>>. Acesso em: 18 set. 2023.
- 7 INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION-IMO. Brief History of IMO. Disponível em: <<http://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>>. Acesso em: 1 nov. 2019a.
- 8 MARPOL. Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios Disponível em: <<https://www.ccaimo.mar.mil.br/marpol>>. Acesso em: 1 nov. 2019.
- 9 INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION-IMO. Greenhouse Gas Emissions. Disponível em: <<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/GHG-Emissions.aspx>>. Acesso em: 30 ago. 2019b.
- 10 LENCWE, M. J.; CHOWDHURY, S. P. D.; OLWAL, T. O. Hybrid energy storage system topology approaches for use in transport vehicles: A review. **Energy Science and Engineering**. John Wiley and Sons Ltd, , 1 abr. 2022.
- 11 KALIKATZARAKIS, M. et al. Ship energy management for hybrid propulsion and power supply with shore charging. **Control Engineering Practice**, v. 76, n. May, p. 133–154, 2018. doi: 10.1016/j.conengprac.2018.04.009.
- 12 BRUNETTI, F, **Motores de Combustão Interna**, 3º ed, vol. 1. São Paulo: Blucher, 2012.
- 13 MORAN, M. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenheiros**. John Wiley & Sons LTD.7. ed. 2013.

- 14 ARIAS, D. **Caracterización De Las Curvas De Presión, Par Y Potencia De Un Motor De Combustión Interna Monocilíndrico Bajo Diferentes Regímenes De Operación.** [s.l.] Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- 15 YUM, K. K.; LEFEBVRE, N.; PEDERSEN, E. An experimental investigation of the effects of cyclic transient loads on a turbocharged diesel engine. **Applied Energy**, v. 185, p. 472–481, 2017. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.138.
- 16 BAE SYSTEMS. Series-E: Electric power and propulsion. Disponível em: <<https://gettozero.com/series-e.php>>.
- 17 ZAHEDI, B.; NORUM, L. E.; LUDVIGSEN, K. B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems. **Journal of Power Sources**, v. 255, p. 341–354, 2014.
- 18 CORVUS. **CASE STUDY: Eidesvik Offshore, Viking Lady OSV.**, 2014.
- 19 LINDSTAD, H.; ESKELAND, G. S.; RIALLAND, A. **Batteries in offshore support vessels – Pollution, climate impact and economics.** Transportation Research Part D, v. 50, p. 409–417, 2017. doi: 10.1016/j.trd.2016.11.023.
- 20 INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION-IMO, **Guidelines for vessels with dynamic positioning systems.MSC/Circ.645.** 1994.
- 21 HANSEN, J. F.; WENDT, F. History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 12, p. 2229–2242, 2015. doi: 10.1109/JPROC.2015.2458990.
- 22 ABEAM. Frota de Embarcações de Apoio Marítimo no Brasil. 2024.
- 23 NÜRNBERG, A. A 500 TONS AHT WINCH WITH ECO-PULL DRIVE TECHNOLOGY. (A. Kr. D. and S. Aksu, Ed.)4th International Conference on Technology and Operations of Offshores Support Vessels. **Anais...**2011.
- 24 L. EDUARDO, L. SISTEMA PROPULSIVO E POSICIONAMENTO DINÂMICO. Disponível em:<http://www1.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/atuais/LuizEduardo/relat1/sistprop.htm>.
- 25 GAINZA, J. **Estudo de instalações propulsoras para navios porta contêineres.** [s.l.: s.n.].
- 26 ASGEIR, J.; TEEL, R. **Hybrid observer for improved transient performance of a marine vessel in dynamic positioning.** 2016.
- 27 SØRENSEN, A. J. A survey of dynamic positioning control systems. **Annual Reviews in Control**, v. 35, n. 1, p. 123–136, 2011. doi: 10.1016/j.arcontrol.2011.03.008.
- 28 GEERTSMA, R. D. et al. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. **Applied Energy**, v. 194, p. 30–54, 2017. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
- 29 SHARDA. Different Types of Marine Propulsion Systems Used in the Shipping World. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/main-engine/different-types-of-marine-propulsion-systems-used-in-the-shipping-world/>>. Acesso em: 30 out. 2019.

- 30 MIYAZAKI, M. R.; SORENSEN, A. J. **NONLINEAR DROOP LOAD SHARING TO MINIMIZE GAS EMISSIONS AND FUEL**. p. 1–8, 2017.
- 31 WÄRTSILÄ. Wärtsilä Controllable Pitch Propeller Systems. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/marine/build/propulsors-and-gears/propellers/wartsila-controllable-pitch-propeller-systems>>. Acesso em: 2 nov. 2019.
- 32 DEDES, E. K.; HUDSON, D. A.; TURNOCK, S. R. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. **Energy Policy**, v. 40, n. 1, p. 204–218, 2012.
- 33 MIYAZAKI, M. R.; SORENSEN, A. J.; VARTDAL, B. J. Reduction of Fuel Consumption on Hybrid Marine Power Plants by Strategic Loading With Energy Storage Devices. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, v. 3, n. 4, p. 207–217, 2016.
- 34 ZOHRABI, N.; SHI, J.; ABDELWAHED, S. An overview of design specifications and requirements for the MVDC shipboard power system. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 104, n. May 2018, p. 680–693, 2019.
- 35 BØ, T. I. et al. Marine Vessel and Power Plant System Simulator. 2015.
- 36 GARCIA, S. **Tecnologias aplicadas DNV**. Rio de Janeiro, 2018.
- 37 LHOMME, W.; TROVÃO, J. P. Zero-emission casting-off and docking maneuvers for series hybrid excursion ships. **Energy Conversion and Management**, v. 184, n. January, p. 427–435, 2019.
- 38 MICHEL REJANI MIYAZAKI. **Modeling and control of hybrid marine power plants**. [s.l.: s.n.].
- 39 WEG. Museu WEG de Ciência e Tecnologia. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/alessandro-volta-conheca-o-inventor-da-pilha-voltaica/#disqus_thread>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- 40 MIGUEL, N. **Simulação de Regimes de Carga e Descarga em Baterias**. Évora: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, dez. 2016.
- 41 CHENG, H. et al. Recent progress of advanced anode materials of lithium-ion batteries. **Journal of Energy Chemistry Elsevier B.V.**, , 1 jun. 2021.
- 42 SOURMEY, I. **Charging your lithium-ion batteries: 5 expert tips for a longer lifespan**.
- 43 FRANCHI, L. **ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE CÉLULA DE LÍTIO**. [s.l.: s.n.]. 2022
- 44 IBRAHIM, H.; ILINCA, A. Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies. **IntechOpen**, 2013.
- 45 MJØS, N. et al. **DNV GL Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems**. [s.l.: s.n.]. 2016
- 46 FARAG, M. **Lithium-Ion Batteries: Modelling and State of Charge Estimation**. Hamilton: McMaster University, jun. 2013.

- 47 HELGESEN, H. MARITIME BATTERY SAFETY JOINT DEVELOPMENT PROJECT Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression Partner Group. 2019.
- 48 SOSKIN, P. Every charge cycle counts when it comes to battery degradation. Disponível em: <<https://www.energy-storage.news/every-charge-cycle-counts-when-it-comes-to-battery-degradation/>>. Acesso em: 6 set. 2023.
- 49 PERALTA, C. P. O. et al. Evaluation of the CO₂ emissions reduction potential of Li-ion batteries in ship power systems. **Energies**, v. 12, n. 3, 24 jan. 2019., doi: 10.3390/en12030375.
- 50 CRUZ, F. G. et al. IDENTIFICATION OF END OF LIFE ON LITHIUM-ION BATTERIES CELLS THROUGH SUPPORT VECTOR MACHINES FOR IN-CHARGER BATTERY MANAGEMENT SYSTEM STRATEGY. **HOLOS**, v. 6, p. 1–16, 16 dez. 2020.
- 51 SANTOS, R. **Estimação do Estado de Carga de Baterias de Lítio-íon em Diferentes Condições de Temperaturas Utilizando Filtros de Kalman**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 22 out. 2019.
- 52 MICROSOFT. Cuidar da bateria em Windows. Disponível em: <<https://support.microsoft.com/pt-br/windows/cuidar-da-bateria-em-windows-2db3e37f-5e7d-488e-9086-ed15320519e4>>. Acesso em: 19 jul. 2023a.
- 53 MUSSA, A. S. et al. Fast-charging to a partial state of charge in lithium-ion batteries: A comparative ageing study. **Journal of Energy Storage**, v. 13, p. 325–333, 1 out. 2017. doi: 10.1016/j.est.2017.07.004.
- 54 FOTOUHI, A. et al. Lithium-Sulfur Cell Equivalent Circuit Network Model Parameterization and Sensitivity Analysis. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 9, p. 7711–7721, 1 set. 2017.
- 55 PORZ, L. et al. Mechanism of Lithium Metal Penetration through Inorganic Solid Electrolytes. **Advanced Energy Materials**, v. 7, n. 20, 25 out. 2017. doi: 10.1002/aenm.201701003.
- 56 BMEHDI, B. L. et al. Observation and quantification of nanoscale processes in lithium batteries by operando electrochemical (S)TEM. **Nano Letters**, v. 15, n. 3, p. 2168–2173, 11 mar. 2015. doi: 10.1021/acs.nanolett.5b00175.
- 57 BLOOMBERG. Top 10 Energy Storage Trends in 2023. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/top-10-energy-storage-trends-in-2023/>>. Acesso em: 6 set. 2023.
- 58 DNV. Maritime Publications DNV. Disponível em: <<https://www.dnv.com/maritime/insights/publications.html?>>. Acesso em: 6 set. 2023.
- 59 *DNV-GL. RULES FOR CLASSIFICATION Ships Edition July 2019 Amended October 2019 Part 6 Additional class notations Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. 2019 a.*
- 60 *DNV-GL. RULES FOR CLASSIFICATION Ships Edition July 2019 Amended October 2019 Part 4 Systems and components Chapter 8 Electrical installations. 2019 b.*

- 61 LINDTJØRN, J. O. et al. Demonstrating the Benefits of Advanced Power Systems and Energy Storage for DP Vessels. **Dynamic Positioning Conference**, p. 1–24, 2014.
- 62 MARTINS, R. et al. Optimal component sizing for peak shaving in battery energy storage system for industrial applications. **Energies**, v. 11, n. 8, 2018. doi: 10.3390/en11082048.
- 63 UDDIN, M. et al. A review on peak load shaving strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. August, p. 3323–3332, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.056.
- 64 CHAPRA, S. C. **Métodos numéricos aplicados com Matlab para Engenheiros e Cientistas**. 3° ed. New York: The McGraw-Hill, 2012.
- 65 REIS, MARCELO. Análise de Séries Temporais. Disponível em: <<https://www.inf.ufsc.br/~marcelo.menezes.reis/Cap4.pdf>>. Acesso em: 7 set. 2023.
- 66 ENDRESEN, Ø. et al. Environmental impacts of the expected increase in sea transportation, with a particular focus on oil and gas scenarios for Norway and northwest Russia. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, v. 108, n. 2, 2007.
- 67 HANSEN, J. F. et al. **INCREASED OPERATIONAL PERFORMANCE OF OSVs BY ONBOARD DC GRID**. Singapore, 2011.
- 68 CHAUHAN, P. J. et al. Fuel efficiency improvement by optimal scheduling of diesel generators using PSO in offshore support vessel with DC power system architecture. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC**, v. 2016- January, p. 1–6, 2016. doi: 10.1109/APPEEC.2015.7380963.
- 69 FZHAO, F. et al. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation. **Applied Energy**, v. 161, n. 2016, p. 124–132, 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.022.
- 70 GARCÍA-OLIVARES, A.; SOLÉ, J.; OSYCHENKO, O. Transportation in a 100% renewable energy system. **Energy Conversion and Management**, v. 158, n. August 2017, p. 266–285, 2018. doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.053.
- 71 AL-FALAH, M. D. A. et al. Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries. **Energy Conversion and Management**, v. 172, n. March, p. 50–66, 2018. doi: 10.1016/j.enconman.2018.07.012.
- 72 BORDIN, C.; MO, O. Including power management strategies and load profiles in the mathematical optimization of energy storage sizing for fuel consumption reduction in maritime vessels. **Journal of Energy Storage**, v. 23, n. March, p. 425–441, 2019. doi: 10.1016/j.est.2019.03.021.
- 73 FU, L.; GAO, X. SOC Optimization Based Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System in Vessel Integrated Power System. **IEEE Access**, v. 8, p. 54611–54619, 2020., doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981545.

- 74 MESTEMAKER, B. T. W. et al. Dynamic simulation of a vessel drive system with dual fuel engines and energy storage. **Energy**, v. 194, p. 116792, 2020. doi: 10.1016/j.energy.2019.116792.
- 75 LETAFAT, A. et al. Simultaneous energy management and optimal components sizing of a zero- emission ferry boat. v. 28, n. December 2019, 2020. doi: 10.1016/j.est.2020.101215.
- 76 PEIXOTO, C. **Modeling, simulation and control of hybrid power systems for vessels**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 5 set. 2022.
- 77 KOLODZIEJSKI, M.; MICHALSKA-POZOGA, I. Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems. **Energies**, v. 16, n. 3, 1 fev. 2023. doi: 10.3390/en16031122.
- 78 AKBARZADEH, M.; DE SMET, J.; STUYTS, J. Battery Hybrid Energy Storage Systems for Full-Electric Marine Applications. **Processes**, v. 10, n. 11, 1 nov. 2022. doi: 10.3390/pr10112418.
- 79 BAIA, G. et al. Viable approaches for the electrification of a ferry operating in the Strait of Messina. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/373484371>>.
- 80 ABEAM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE APOIO MARÍTIMO. Tipos de embarcações. Disponível em: <<https://abeam.org.br/embarcacoes/>>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- 81 MICROSOFT. O que é o Power Query? Disponível em: <<https://learn.microsoft.com/pt-br/power-query/power-query-what-is-power-query>>. Acesso em: 30 jul. 2023b.
- 82 CATERPILLAR. **Performance Data CAT3512c**. [s.l: s.n.].
- 83 SCHMITZ, M. I. **DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS TERMODINÂMICOS PARA PROJETOS DE EQUIPAMENTOS DE REFRIGERAÇÃO PARA CARROCERIAS FRIGORÍFICAS**. Lajeado: Centro Universitário UNIVATES, jun. 2016.
- 84 **ASHRAE. 2010 ASHRAE handbook : refrigeration**. [s.l.] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2010.
- 85 TESVOLT. Lithium Storage System TS HV 70. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://nencom.com/f/products/batteries/tesvolt/tesvolt-hv-70-data-sheet.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- 86 VOLTAI. Voltai Energy Product Information. Disponível em: <https://www.voltaienergy.com/bess_container/show-98.html>. Acesso em: 19 set. 2023.
- 87 RÊGO, R. et al. **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. 3. ed. Rio de Janeiro: FGV Editora, 2013.
- 88 BACEN. Taxas de juros básicas - Histórico. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 10 set. 2023.

- 89 NAY, C. Providing value to residents with smart metering. Disponível em: <<https://www.saft.com/energizing-iot/techem-providing-value-residents-smart-metering>>. Acesso em: 17 set. 2023.
- 90 LITHIUMBATTERYWALE. JouLie. Disponível em: <<https://www.lithiumbatterywale.com/joulie.php>>. Acesso em: 17 set. 2023.
- 91 GREENLINE. Key Technologies - Greenline Hybrid System. Disponível em: <<https://greenlinehybridnw.com/about-greenline-yachts/greenline-hybrid-key-technologies/>>. Acesso em: 17 set. 2023.
- 92 'RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. **Our World in Data**, 2020.

APÊNDICE

Figuras retiradas do arquivo em Excel no simulador:

DADOS DE ENTRADA															
OPERAÇÃO			POTÊNCIAS DEMANDADAS PARA OS MOTORES SEM BATERIA					CONSUMO DOS MOTORES SEM BATERIA				CONSUMO ESPECÍFICO DOS MOTORES SEM BATERIA			
		H	kw	kw	kw	kw	kw	L/h	L/h	L/h	L/h	(L/h)/KW	(L/h)/KW	(L/h)/KW	(L/h)/KW
INDICE	OPERAÇÃO	horadecimial	Load G1	Load G2	Load G3	Load G4	soma Load	Fuel Consumption G1	Fuel Consumption G2	Fuel Consumption G3	Fuel Consumption G4	SFC LOAD G1	SFC LOAD G2	SFC LOAD G3	SFC LOAD G4
4700	Stand by 2 Y	11,0497222	0	397	387	0	784	0	122	126	0	0,0000	0,3073	0,3256	0,0000
4701	Stand by 2 Y	11,0500000	0	397	387	0	784	0	122	126	0	0,0000	0,3073	0,3256	0,0000
4702	Stand by 2 Y	11,0502778	0	397	387	0	784	0	122	126	0	0,0000	0,3073	0,3256	0,0000
4703	Stand by 2 Y	11,0505556	0	418	465	0	883	0	128	129	0	0,0000	0,3062	0,2774	0,0000
4704	Stand by 2 Y	11,0508333	0	418	465	0	883	0	128	129	0	0,0000	0,3062	0,2774	0,0000
4705	Stand by 2 Y	11,0511111	0	418	465	0	883	0	128	129	0	0,0000	0,3062	0,2774	0,0000
4706	Stand by 2 Y	11,0513889	0	418	465	0	883	0	128	129	0	0,0000	0,3062	0,2774	0,0000

Figura 107: Dados de entrada do simulador.

POT. TOTAL DOS MOTORES C/BATERIA				
CARGA MÉDIA [kW]	G1 [kW]	G2 [kW]	G3 [kW]	G4 [kW]
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000
757,207	757,207	0,000	0,000	0,000

Figura 108: Potência dos motores com a estratégia DMS e 1 motor em operação.

POT. TOTAL DOS MOTORES C/BATERIA				
CARGA MÉDIA [kW]	G1 [kW]	G2 [kW]	G3 [kW]	G4 [kW]
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000
757,207	378,603	0,000	378,603	0,000

Figura 109: Potência dos motores com a estratégia DMS e 2 motores em operação.

POT. E ENERGIA BATERIA				
Dif HD [h]	PotBat [kW]	Pot(net)Bat [kW]	EnerBat[kWh]	EnerAcum [kWh]
0,0002778	3,2066	2,5693	0,0007	0,0007
0,0002778	3,2066	2,5693	0,0007	0,0014
0,0002778	3,2066	2,5693	0,0007	0,0021
0,0002778	-15,7934	-17,4388	-0,0048	-0,0027
0,0002778	-15,7934	-17,4388	-0,0048	-0,0075
0,0002778	-15,7934	-17,4388	-0,0048	-0,0124
0,0002778	-15,7934	-17,4388	-0,0048	-0,0172
0,0002778	-15,7934	-17,4388	-0,0048	-0,0221

Figura 110: Cálculo das potências e energia da bateria.

STATE OF CHARGE SOC					
SOC100	SOC200	SOC300	SOC400	SOC500	SOC600
80,001%	80,000%	80,000%	80,000%	80,000%	80,000%
80,001%	80,001%	80,000%	80,000%	80,000%	80,000%
80,002%	80,001%	80,001%	80,001%	80,000%	80,000%
79,997%	79,999%	79,999%	79,999%	80,00%	80,000%
79,992%	79,996%	79,997%	79,998%	80,00%	79,999%
79,988%	79,994%	79,996%	79,997%	80,00%	79,998%
79,983%	79,991%	79,994%	79,996%	80,00%	79,997%
79,978%	79,989%	79,993%	79,994%	80,00%	79,996%

Figura 111: SOC das diferentes baterias, de acordo com suas capacidades.

CONSUMO MOTOR SEM A BATERIA									
CONSUMO [L]					CONSUMO ACUMULADO [L]				
CONSG1	CONSG2	CONSG3	CONSG4	ΣCONS	ACUMCONSG1	ACUMCONSG2	ACUMCONSG3	ACUMCONSG4	ACUM ΣCONS
0,0000	0,0306	0,0289	0,0000	0,0594	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0594
0,0000	0,0311	0,0314	0,0000	0,0625	0,0000	0,0311	0,0314	0,0000	0,1219
0,0000	0,0311	0,0314	0,0000	0,0625	0,0000	0,0622	0,0628	0,0000	0,1844
0,0000	0,0311	0,0314	0,0000	0,0625	0,0000	0,0933	0,0942	0,0000	0,2469
0,0000	0,0311	0,0314	0,0000	0,0625	0,0000	0,1244	0,1256	0,0000	0,3094
0,0000	0,0311	0,0314	0,0000	0,0625	0,0000	0,1556	0,1569	0,0000	0,3719
0,0000	0,0339	0,0350	0,0000	0,0689	0,0000	0,1894	0,1919	0,0000	0,4408
0,0000	0,0339	0,0350	0,0000	0,0689	0,0000	0,2233	0,2269	0,0000	0,5097

Figura 112: Dados de consumo coletados para o SGE do navio, na operação convencional, sem a hibridização.

CONSUMO COM BATERIA					
G1 [L/h]	G2 [L/h]	G3 [L/h]	G4 [L/h]	CONSUMO TOTAL [L]	CONSUMO TOTAL ACUMULADO [L]
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,056
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,113
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,169
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,226
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,282
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,338
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,395
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,451
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,508
203,081	0,000	0,000	0,000	0,056	0,564

Figura 113: Consumos do SGE do navio, simulados com a hibridização.