

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



João Victor Mey Padilha de Moraes

**Análise de impacto da implementação de hibridização em
embarcações marítimas**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro

Novembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores da graduação de ambas as instituições PUC-Rio e École Centrale de Marseille, que tanto me ajudaram neste processo de aprendizagem.

Aos meus professores do Colégio Santo Agostinho, que me proporcionaram uma excelente base na minha formação tanto acadêmica quanto como pessoa e cidadão.

Ao meu orientador, Professor Sergio Leal Braga, por tanto me auxiliar em meu desenvolvimento e aprofundamento no tema desenvolvido ao longo deste trabalho

Aos meus familiares, que sempre foram fontes de inspiração para minha vida, me motivando e me engajando a me tornar um profissional e uma pessoa melhor.

Agradeço também a todos os meus líderes e colegas de trabalho que tive durante o período da graduação, que tanto me ensinaram durante o trajeto.

Finalmente, agradeço meus amigos que sempre me apoiam e me incentivam a seguir minhas metas e objetivos, acreditando em meu potencial.

RESUMO

Análise de impacto da implementação de hibridização em embarcações marítimas

A busca pela redução dos impactos humanos no meio ambiente é uma forte tendência e necessidade do contexto atual. Em um planeta cada vez mais impactado pelas mudanças climáticas e suas consequências, torna-se urgente a revisão e procura de melhorias para nossos processos atuais, a partir de soluções mais sustentáveis e em equilíbrio com o ecossistema global. Uma das frentes de atuação dessa problemática é ligada à locomoção e emissão de carbono para a atmosfera terrestre. Mais especificamente, o setor de transportes marítimos é de extrema importância e ao mesmo tempo um grande emissor de dióxido de carbono. Nesse contexto, o presente trabalho se dedica ao estudo do impacto da introdução de baterias no consumo de combustível de embarcações, para em seguida apresentar análises relativas às baterias utilizadas. Os resultados evidenciam a possibilidade de ganhos tanto financeiros quanto ambientais, ao destacar-se a potencial economia de combustíveis fósseis em até 32% , além de esclarecerem pontos importantes na decisão de critérios-chaves da bateria introduzida.

Palavras-chaves: Hibridização. Bateria. *Peak-shaving*. Eficiência Descarbonização.

ABSTRACT

Impact analysis of the hybridization implementation in marine vessels

The research for reduction of human impacts on the environment is very strong in the present. On a planet increasingly impacted by climate change and its consequences, it is urgent to review and seek improvements to our current processes, in order to obtain more sustainable solutions, balanced with the global ecosystem. One of the important fronts of this problem is linked to the locomotion and emission of carbon to the Earth's atmosphere. More specifically, the maritime transport sector is extremely relevant and at the same time a major emitter of carbon dioxide. In this context, the present work is dedicated to the study of the impact of the introduction of batteries on the fuel consumption of vessels, and then presents analyses related to the batteries applied. The results have shown the possibility of both financial and environmental gains, by highlighting the potential economy of 32% in fossil fuels , besides clarifying important points in the decision of key criteria of the introduced battery.

Keywords: Hybridization. Battery. Peak-shaving. Efficiency. Decarbonisation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Motivação	11
1.2. Objetivos	15
1.3. Estrutura do trabalho	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
3. METODOLOGIA	24
3.1. Conceitos-chaves	24
3.2. Embarcação	26
3.3. Funcionamento regular	27
3.4. Peak-shaving	29
3.5. Cálculo da economia de combustíveis	31
3.6. Estudo da bateria a ser implementada	32
4. RESULTADOS	34
4.1. Aplicação do peak-shaving	34
4.2. Economia de combustíveis	42
4.3. Bateria a ser implementada	44
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	51
5.1. Estudo da economia de combustíveis	51
5.2. Estudo da bateria a ser utilizada	52
6. BIBLIOGRAFIA	55

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Composição da Matriz Energética Mundial, em 1967 [9].
- Figura 2: Composição da Matriz Energética Mundial, em 2019 [9].
- Figura 3: Evolução da matriz energética do setor de transportes [10]
- Figura 4: Emissões de GEE por modalidade de transporte [10]
- Figura 5: Evolução da matriz energética global [2].
- Figura 6: Acoplamento em paralelo [16]
- Figura 7: Comparação de modelos de hibridização [17]
- Figura 8: Análise financeira da hibridização [17]
- Figura 9: Estrutura para suporte do peak-shaving [18]
- Figura 10: Estrutura lógica do sistema [18]
- Figura 11: Exemplo de estudo de consumo específico de combustível [4]
- Figura 12: C-Rate e o impacto na performance das baterias [6]
- Figura 13: Representação esquemática dos motores da embarcação de referência.
- Figura 14: Perfil da potência total fornecida pelos quatro geradores no tempo.
- Figura 15: Representação do consumo específico de combustível real ao longo do tempo, em litros por hora por kW.
- Figura 16: Representação gráfica de SFC versus Potência de um motor.
- Figura 17: Exemplo ilustrativo do acoplamento de uma bateria para realização do peak-shaving na embarcação [8].
- Figura 18: Relação entre consumo (L/h) e Potência por gerador (kW)

Figura 19: Média móvel (50s) da potência fornecida pelos quatro geradores

Figura 20: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média móvel em 50s

Figura 21: Média móvel (100s) da potência fornecida pelos quatro geradores

Figura 22: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média móvel em 100s

Figura 23: Média móvel (200s) da potência fornecida pelos quatro geradores

Figura 24: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média móvel em 200s

Figura 25: Média simples da potência fornecida pelos quatro geradores

Figura 26: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média simples

Figura 27: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média móvel 50s

Figura 28: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média móvel 100s

Figura 29: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média móvel 200s

Figura 30: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média simples

Figura 31: Comparação do consumo específico de combustível entre o funcionamento regular da embarcação e com a aplicação do *peak-shaving*.

Figura 32: C-Rate(t) para uma bateria de 100 kWh.

Figura 33: C-Rate(t) para uma bateria de 200 kWh.

Figura 34: C-Rate(t) para uma bateria de 300 kWh.

Figura 35: C-Rate(t) para uma bateria de 400 kWh.

Figura 36: C-Rate(t) para uma bateria de 500 kWh.

Figura 37: C-Rate(t) para uma bateria de 600 kWh.

Figura 38: State of Charge de baterias como única fonte de alimentação da embarcação.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação de missões de acordo com o tempo de carga e descarga [17]

Tabela 2: Dados do fornecedor da relação entre potência de cada motor e o consumo específico de combustível.

Tabela 3: Potência a partir dos *Energy Storage* e *C-Rate* da bateria.

Tabela 4: Variância da potência fornecida pelo motor em relação à média móvel aplicada

Tabela 5: Comparação de consumo de combustível em relação com a aplicação do peak-shaving

Tabela 6: Comparação de consumo de combustível em relação com a aplicação do peak-shaving e número de geradores

Tabela 7: C-Rate máximo por estocagem de bateria

Tabela 8: Potência máxima demandada pela bateria

Tabela 9: Classificação dos valores da Tabela 3, em relação ao atendimento da demanda.

Tabela 10: Tempo de autonomia de baterias de acordo com a capacidade total de estocagem.

Tabela 11: Resumo das informações relativas às baterias analisadas

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo do consumo específico de combustível do conjunto de motores a partir dos consumos específicos individuais

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Uma das maiores preocupações ambientais da atualidade é relativa à matriz energética mundial. Este receio se dá, principalmente, por conta da alta participação do petróleo, carvão, e gás natural como fontes de energia global.

Um estudo da FGV Energia realizado em 2020 [9] em relação à composição da matriz energética mundial demonstra a evolução da participação de fontes renováveis e menos poluentes de energia na matriz, conforme ilustrado nas figuras 1 e 2 a seguir:

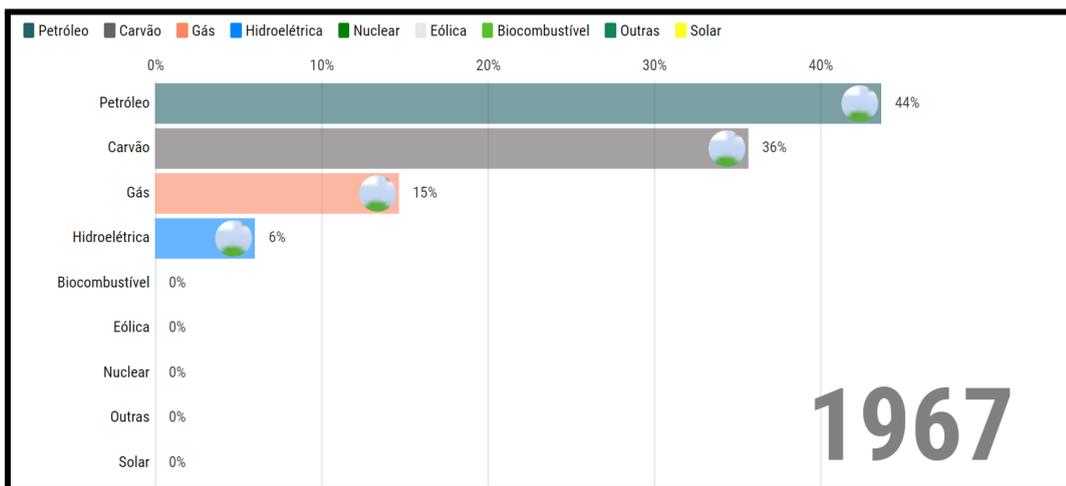


Figura 1: Composição da Matriz Energética Mundial, em 1967

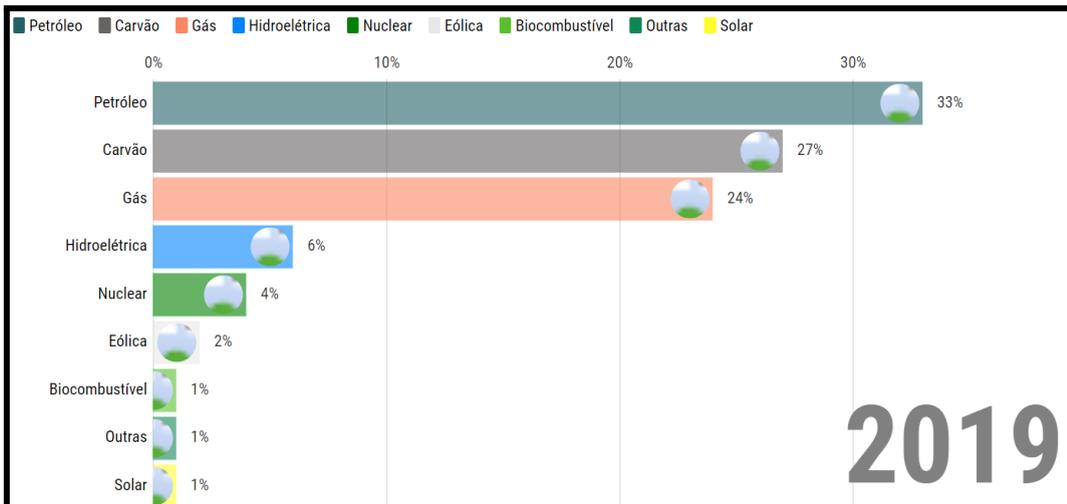


Figura 2: Composição da Matriz Energética Mundial, em 2019

Dessa forma, ainda que a comparação dos dois momentos (1967 e 2019) nos indique uma pequena evolução em direção à uma matriz energética de menor impacto ao meio ambiente, esta mudança ainda representa muito pouco, dado o período de tempo observado e a evolução dos impactos causados pelos principais meios de obtenção de energia.

Conforme observado na Figura 2, as três principais fontes de energia (petróleo, carvão e gás) ainda representam perto de 84% da matriz global e, nesse contexto, conclui-se que ainda existe muito espaço para melhorias em direção à uma composição mais limpa desta.

Entrando mais profundamente no setor de transportes, objetivo deste trabalho, temos que aproximadamente 14% das emissões totais anuais sejam realizadas por este setor, demonstrando assim o alto impacto deste no ecossistema global. Ao mesmo tempo, conforme as diferentes tecnologias têm avançado, o setor tem se intensificado, e as emissões provenientes deste têm aumentado ainda mais.

Observa-se, por exemplo, a alteração da matriz energética do setor entre os anos de 2000 e 2015, conforme ilustrado na imagem abaixo:

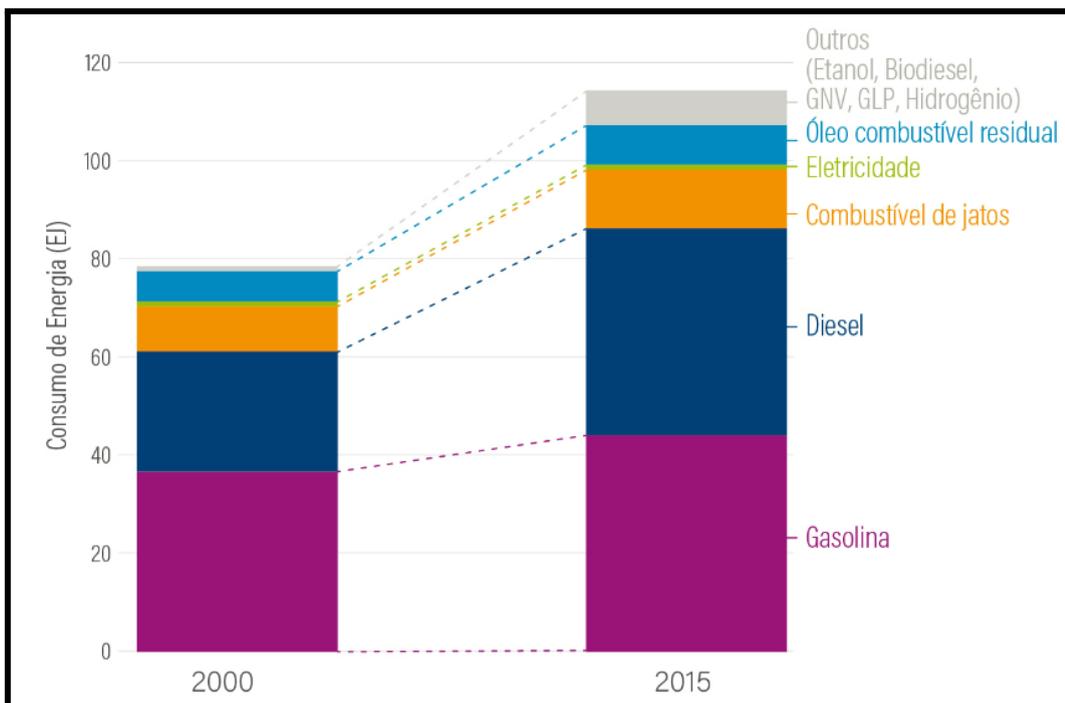


Figura 3: Evolução da matriz energética do setor de transportes [10]

Conforme visto na Figura 3, ainda que fontes menos poluentes tenham aumentado sua participação na matriz energética do setor, o consumo total deste também tem apresentado aumento, muito ligado à intensificação da globalização, entre outros.

Além disso, observa-se também a seguinte divisão de emissões de GEE entre os diferentes modais de transporte:

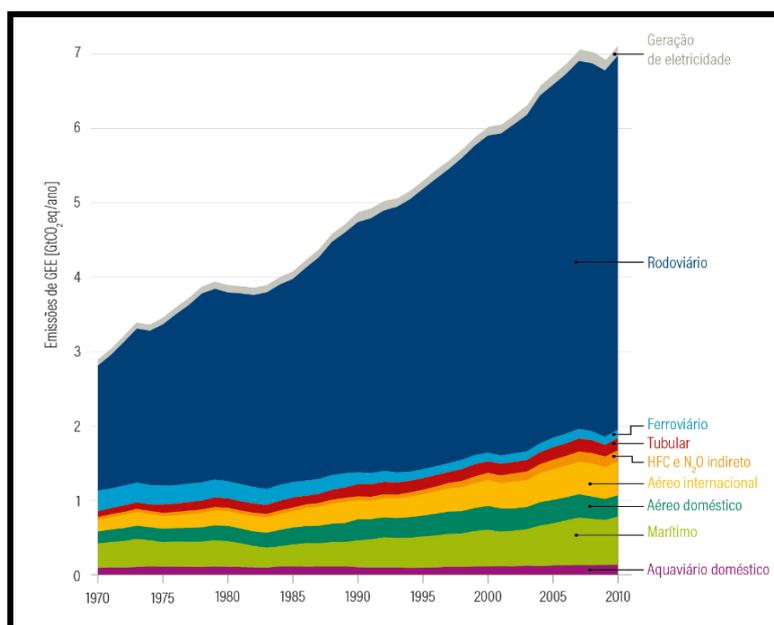


Figura 4: Emissões de GEE por modalidade de transporte [10]

Nesse contexto, olhando mais a fundo para o transporte marítimo, temos, segundo a Organização Marítima Internacional (“*International Maritime Organization*”), que o transporte marítimo global corresponde a, no mínimo, 3% das emissões totais de gases de efeito estufa na atmosfera, como por exemplo o gás carbônico (CO₂) [1].

Em conjunto, entende-se que o pico de demanda por combustíveis fósseis se aproxima cada vez mais do momento presente, dado principalmente a rápida evolução e desenvolvimento de modos menos poluentes de energia. Dessa forma, observa-se a concretização da transição energética, conforme demonstrado na projeção abaixo, onde estima-se que em 2050, 50% da matriz energética global será composta de fontes de energia com base em eletricidade e hidrogênio [2].

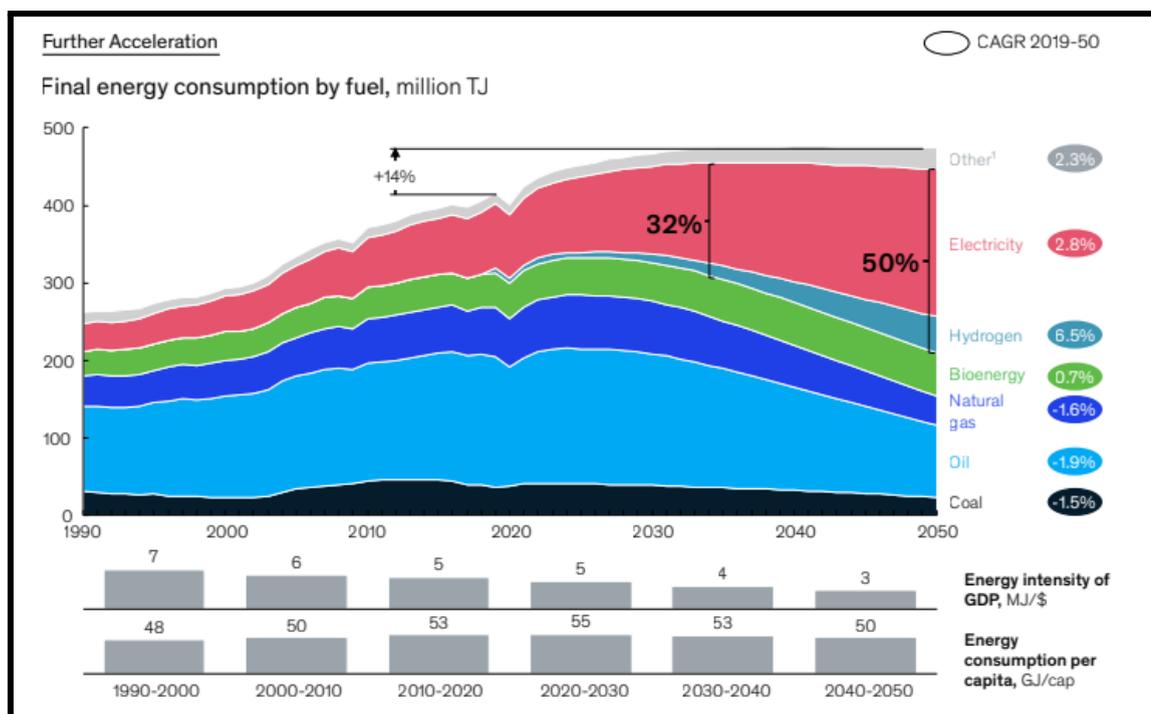


Figura 5: Evolução da matriz energética global [2]

Levando-se em consideração a importância desta modalidade de transporte para a economia global, juntamente à tendência mundial de descarbonização de veículos em geral, torna-se necessário o estudo e aprofundamento em melhorias processuais para redução do impacto ambiental de nossas atividades.

O potencial de redução de emissões de GEE neste setor é muito relevante, dado as mais recentes estimativas de que o mundo teria em torno de 30 milhões de embarcações a motor, ainda fortemente dependentes de óleos combustíveis marítimos e diesel marítimo [11].

Neste projeto, estaremos focados em processos envolvendo um tipo específico de embarcação, da qual os dados foram obtidos experimentalmente, de modo a analisar os resultados e ganhos obtidos a partir da introdução de baterias junto aos motores de uma embarcação, em diferentes cenários de operação.

1.2. Objetivos

Este trabalho busca, a partir de dados experimentais obtidos em relação à embarcação de referência, estudar e explicar a redução do impacto ambiental a partir da implementação de uma bateria junto aos motores do navio, em regimes de funcionamento específicos.

Neste contexto, algumas frentes de trabalho serão abordadas ao longo do projeto:

- 1.2.1. Considerando o consumo de energia e a potência fornecida pelos motores da embarcação, que características a bateria a ser acoplada deve possuir, e como otimizar sua escolha de modo a balancear vida *versus* custo?
- 1.2.2. Qual é a economia de combustíveis fósseis planejada com a introdução da bateria, e como ela se dá?

1.3. Estrutura do trabalho

Anteriormente, foram apresentados o resumo, contexto e objetivo para este trabalho. Em seguida, ao longo do capítulo de revisão da

literatura, serão abordados alguns exemplos similares que já foram estudados por outros materiais, para em seguida a apresentação da metodologia deste projeto, junto da a formulação teórica e premissas utilizadas, de modo a dar maior luz ao processo de obtenção dos resultados. Finalmente, os capítulos seguintes trarão os resultados obtidos, assim como suas representações gráficas, para enfim explicitar-se as conclusões obtidas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Conforme indicado anteriormente, o momento atual tem atraído muitas preocupações em relação aos impactos das atividades humanas no meio ambiente. Dessa forma, dentro do contexto deste projeto, em relação às embarcações marítimas, diversos outros trabalhos já foram realizados com intenção de estudar possíveis reduções de consumo de combustíveis, e conseqüentemente, emissões de GEE. A partir disso, é possível entender o embasamento teórico e comparar com os resultados obtidos.

As diferentes referências utilizadas demonstram resultados bastante distintos em relação à possível economia de combustíveis, mas ao mesmo tempo demonstram importantes comparativos de aplicação do método deste documento. Abaixo, por exemplo, são apresentadas duas aplicações de introdução de baterias em embarcações a partir de outros métodos que não o *peak-shaving*, centro de estudo deste projeto.

O trabalho realizado por Barelli (2018) [12], por exemplo, desenvolve uma análise dinâmica da hibridização de uma embarcação de uso turístico, com porte menor do que a embarcação de referência deste trabalho. O projeto explicita as diferentes formas de organização da estrutura híbrida de um veículo, que podem ser classificadas da seguinte forma:

- Em série: Acoplamento conjunto do motor a combustão e do sistema elétrico, mais eficiente em baixas velocidades e maiores embarcações
- Em paralelo: Acoplamento independente do motor a combustão e do sistema elétrico, podendo atuar individualmente ou em conjunto, mais eficiente em altas velocidades.
- Série-Paralelo: Representa uma combinação das duas estruturas anteriores, possibilitando a transição entre ambas, de modo a aproveitar a maior eficiência de cada uma destas. Por outro lado,

esta configuração possui maiores custos e dificuldades de implementação.

Neste exemplo, o acoplamento de uma bateria ocorre de modo em paralelo, em uma embarcação que demanda potências entre zero e 140 kW, onde a potência elétrica fornecida fica entre zero e 20 kW durante toda a simulação. O esquema abaixo, representado no trabalho de Ehsani (2009) demonstra o funcionamento organizacional desta configuração:

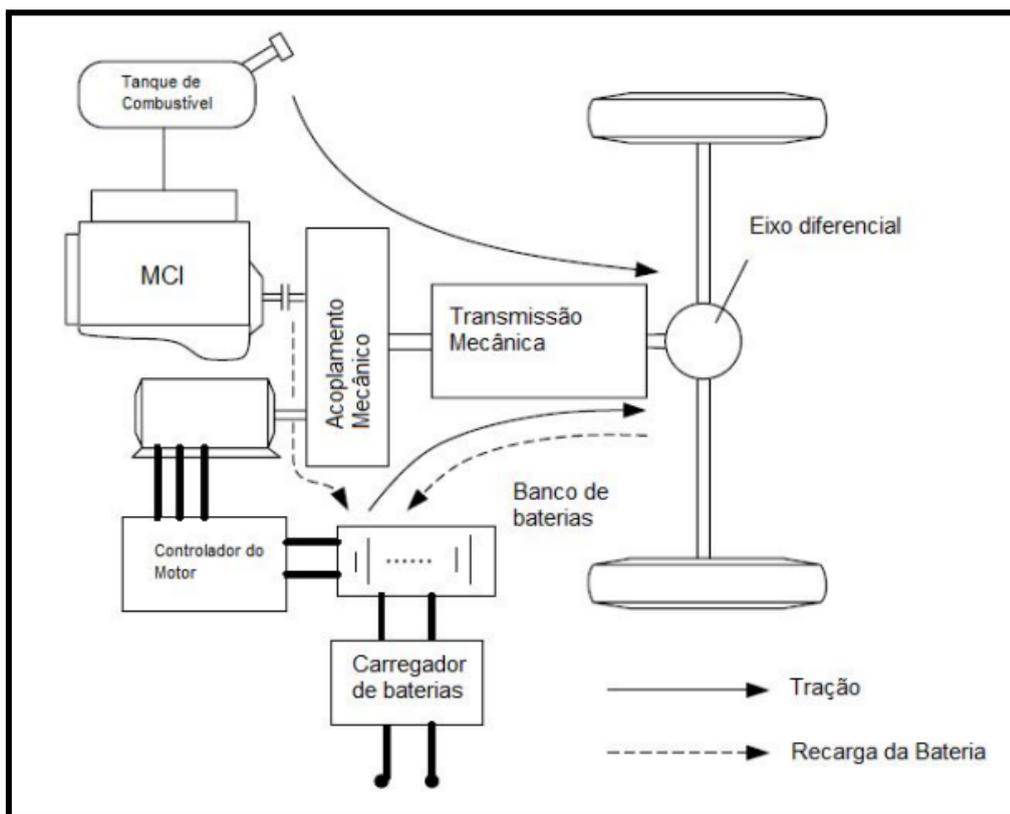


Figura 6: Acoplamento em paralelo [16]

Conforme observado na figura, a parte elétrica e a parte a combustão se encontram separados, podendo agir de forma conjunta ou independente.

Ainda que em uma escala diferente, o trabalho explora a participação da bateria em proporções reduzidas em relação à este, mas resulta em uma economia de 2% do consumo específico de combustível na operação observada, o que nos fornece um comparativo interessante para o resultado que será abordado ao final do relatório. Além disso, o

artigo também desenvolve as simulações com duas baterias diferentes, comparando eficiência, custo, peso, entre outros. Dessa forma, são consideradas características das baterias que não são abordadas neste relatório, que podem seguir como próximos passos para aprofundamento das análises.

Por outro lado, algumas diferentes frentes de trabalho já apresentam resultados mais agressivos, como o caso do estudo conduzido por Ovrum (2015), no qual estima-se que o acoplamento de uma bateria de íon de lítio seria capaz de gerar uma economia de quase 30%, o que se traduz em uma economia de 110 mil dólares ao ano para a embarcação observada.

Ainda nesse contexto, o trabalho realizado por Kim et al. (2019) [17] também analisa a introdução de hibridização em embarcações, porém a partir da comparação entre baterias de íon de lítio e supercapacitores, como ilustrado na imagem abaixo:

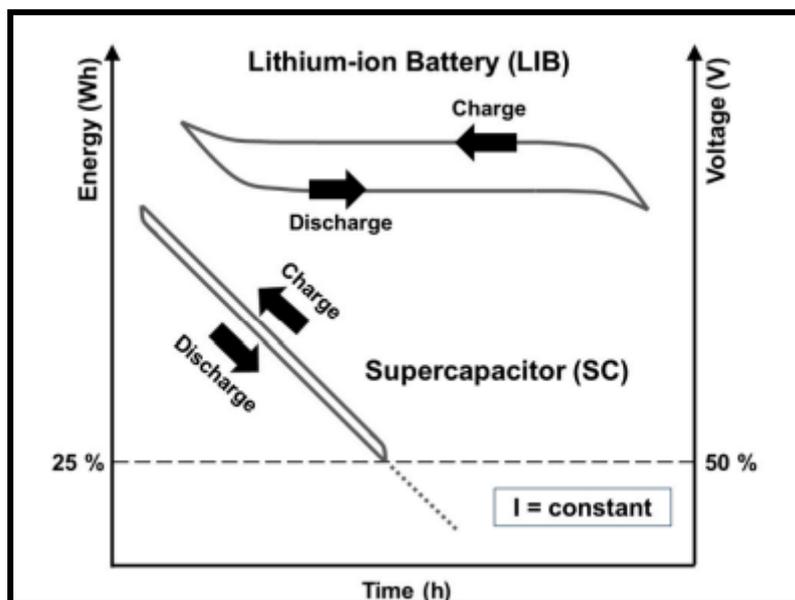


Figura 7: Comparação de modelos de hibridização [17]

A partir disto, o trabalho realiza diversas simulações em relação aos diferentes momentos de operação, e conclui um alto potencial de ganho para as atividades de carga e descarga da embarcação de referência, ou

seja, nos portos. O projeto ainda consegue separar por gás poluente a possível economia, identificada na tabela abaixo:

Cargo Handling Time at a Port (h) ¹	Conventional System (ton/yr)			Proposed System (ton/yr)			Emission Reduction (%)		
	CO ₂	SO _x	NO _x	CO ₂	SO _x	NO _x	CO ₂	SO _x	NO _x
60	1724.91	19.59	31.25	1237.33	18.86	20.23	28.27	3.73	35.26
90	1944.83	19.73	35.16	1289.03	18.87	20.29	33.72	4.36	42.29
120	2164.75	19.87	39.07	1340.72	18.88	20.34	38.07	4.98	47.94
150	2384.67	20.00	42.98	1392.41	18.89	20.40	41.61	5.55	52.54
180	2604.59	20.14	46.89	1444.11	18.90	20.45	44.56	6.16	56.39

¹ Assuming that the ship visits 20 ports per year with a sailing time of 10 d.

Tabela 1: Comparação de missões de acordo com o tempo de carga e descarga [17]

Finalmente, um estudo financeiro é realizado, e os ganhos apresentados fornecem um incentivo relevante para a implementação, conforme indica a imagem abaixo:

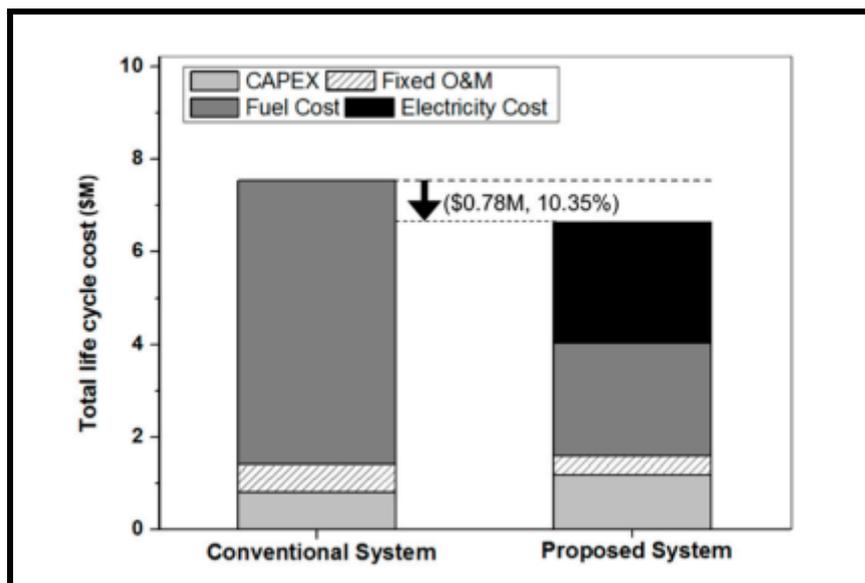


Figura 8: Análise financeira da hibridização [17]

Entre diversos resultados, em todos observa-se ganhos significativos com o acoplamento de uma bateria aos geradores de embarcações, independente do porte dos veículos ou regime de operação.

Em seguida, também há uma frente de trabalho muito explorada em relação à aplicação do *peak-shaving* e a modelagem das características da bateria a serem utilizadas de modo a obter-se o melhor custo-benefício.

O trabalho desenvolvido por Martins et al. (2018) [14], por exemplo, fornece uma base interessante de cruzamento entre estocagem de baterias, necessidade de fornecimento de energia e envelhecimento do equipamento, de modo a modelar a melhor composição, obtendo a maior economia possível. Com aplicação em outro setor, sendo neste caso focado na indústria, a utilização do *peak-shaving* nesse caso reduz os “picos” de potência em 6%, levando a uma economia anual de 15 mil euros.

Além disso, a utilização do método do *peak-shaving* também possui aplicações diversas diferentes do contexto de embarcações marítimas, o que aumenta o universo comparativo de boas práticas e resultados, como por exemplo o trabalho efetuado por YANG, Shu-Xia et al [15], que aborda o método para o transporte urbano de ônibus. Neste, são observados resultados de diminuição da flutuação da potência do motor em até 92%.

Ademais da apresentação de outra aplicação do *peak-shaving*, o trabalho também explicita uma perspectiva de aumento significativo da hibridização da frota urbana para os próximos anos, o que demonstra que este setor também poderá fornecer fontes importantes para a continuidade do trabalho no setor marítimo.

Finalmente, o artigo realizado por Wang (2013) fornece uma outra perspectiva da *peak-shaving*, uma vez que aborda também a estruturação necessária à embarcação para funcionamento do método, ilustrado pela imagem abaixo:

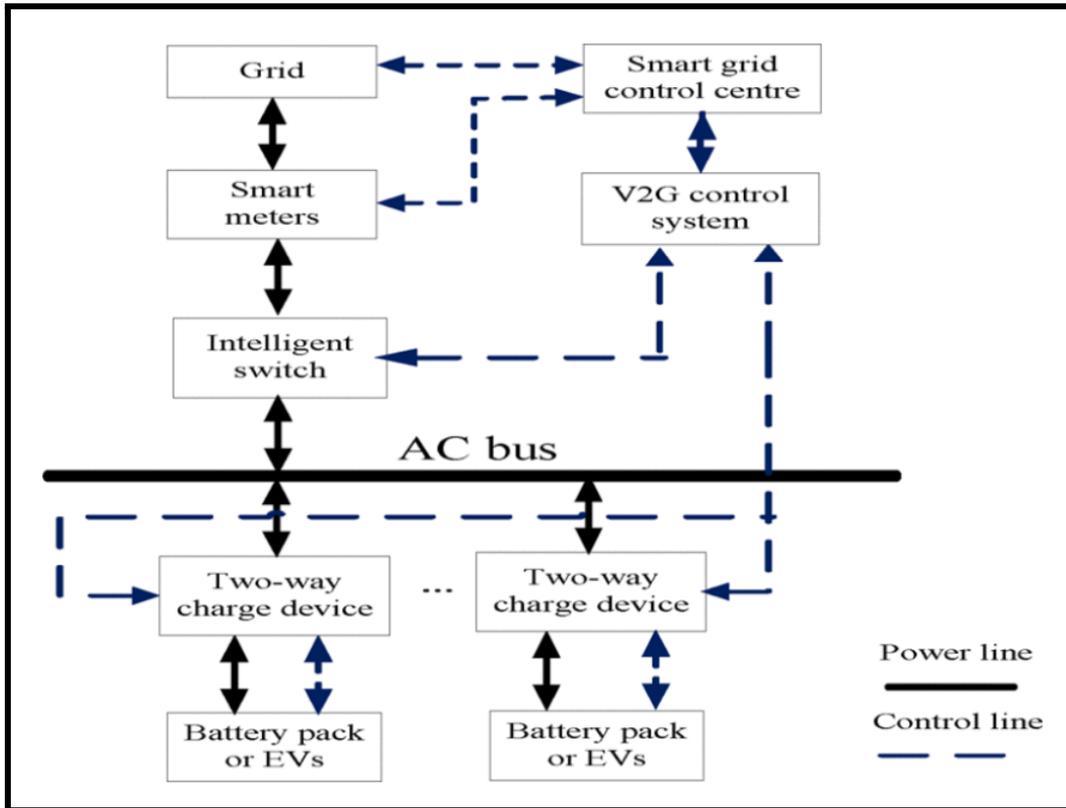


Figura 9: Estrutura para suporte do peak-shaving [18]

Esta estrutura, conforme observado acima, demanda uma organização lógica complexa, que é demonstrada também no trabalho, indicado abaixo:

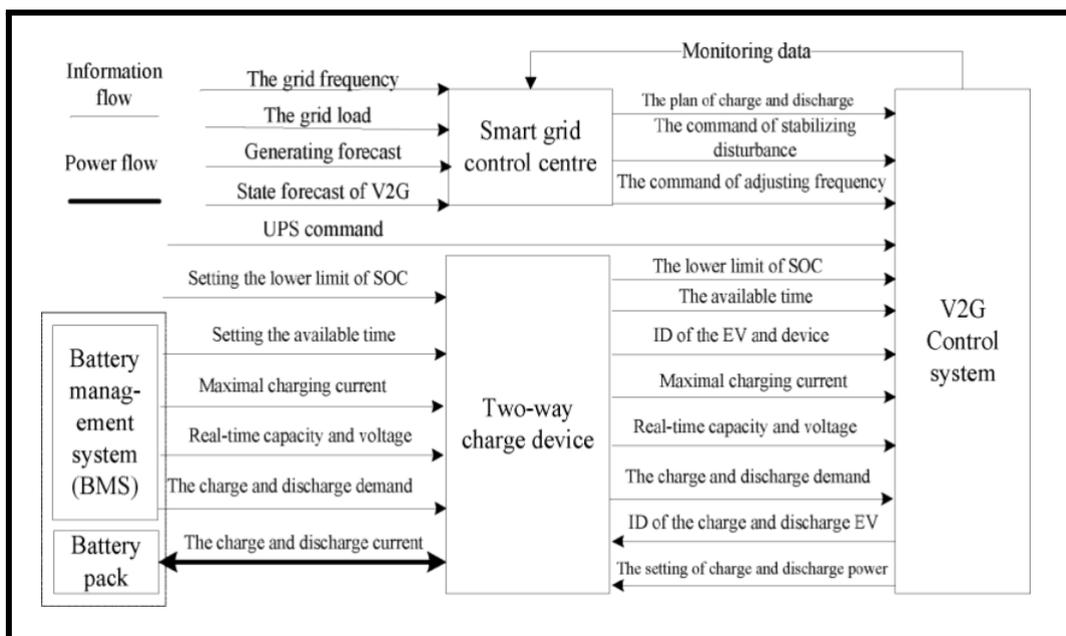


Figura 10: Estrutura lógica do sistema [18]

Este trabalho é um importante referencial para o projeto que será desenvolvido ao longo deste documento, uma vez que não é abordada a questão de implementação do *peak-shaving*, apenas seu funcionamento teórico e possíveis resultados. Nesse contexto, a estrutura demonstrada em [18] pode funcionar como um importante referencial de partida para a aplicação prática do proposto, assim como o operacional lógico envolvido.

Dessa forma, os trabalhos referenciados neste relatório também poderão servir como base para continuação do projeto, que terá seus próximos passos explicitados ao final deste.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será descrito o funcionamento da bateria introduzida, assim como também será explicitado características da embarcação utilizada. Além disso, os principais conceitos-chaves que serão explorados ao longo do trabalho serão apresentados, para finalmente demonstrar o embasamento para os cálculos realizados.

3.1. Conceitos-chaves

a. Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível (“*Specific fuel consumption*”, em inglês), é uma métrica representativa da eficiência com a qual uma máquina, veículo, ou planta converte a energia de combustíveis em energia mecânica [3]. Aplicando para o contexto de embarcações marítimas, existem diversos critérios relativos ao modo de operação que podem impactar o consumo de combustível, como por exemplo o peso total, a velocidade utilizada, o regime, entre outros, como exemplificado na imagem abaixo:

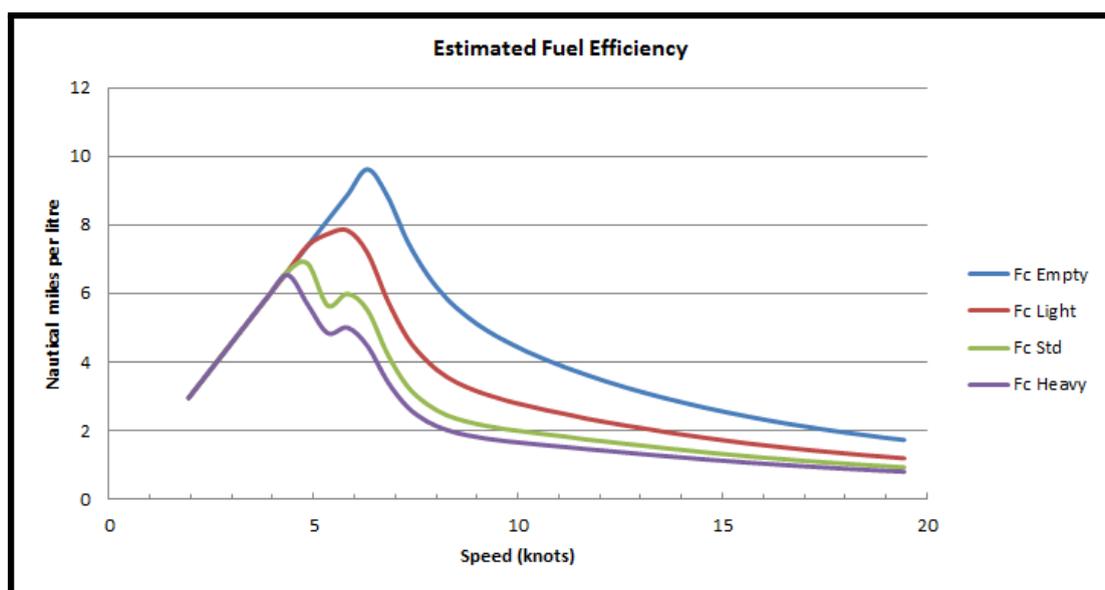


Figura 11: Exemplo de estudo de consumo específico de combustível [4]

Conforme visto na figura 11 acima, em geral, o consumo específico de combustível é maior com regimes mais intensos de movimento, ao mesmo tempo que maiores velocidades costumam implicar em um maior gasto de combustível por distância. Ao longo deste trabalho, estaremos analisando o consumo específico de combustível em relação à energia consumida, logo veremos outro tipo de relação.

b. “*State of Charge*” de uma bateria

O *State of Charge* de uma bateria representa o estado de carga desta em um momento específico. Dessa forma, representa a diferença entre a bateria no estado atual *versus* a bateria totalmente carregada.

c. “*C-Rate*” de uma bateria

O *C-Rate* de uma bateria é uma medida que representa a taxa de descarga desta em relação à sua carga máxima [5]. Por exemplo, uma *C-Rate* de 1C significa descarga total da bateria em uma hora, conforme demonstrado na imagem abaixo:

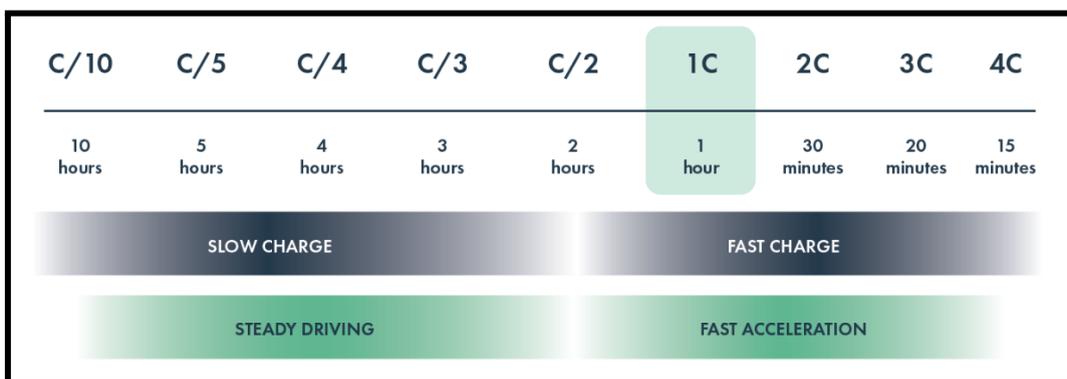


Figura 12: *C-Rate* e o impacto na performance das baterias [6]

Dessa forma, vemos que o *C-Rate* impacta, em relação à potência da bateria, o quanto de energia essa poderá fornecer ao longo de seu ciclo de carga e logo o custo de uma bateria é crescente em relação à esta medida.

d. “Depth of Discharge” de uma bateria (“DoD”)

Em português, a Profundidade de Descarga de uma bateria é representada pelo percentual de descarga de uma bateria em relação à capacidade máxima, antes de iniciado um novo ciclo de carga [5].

e. “Energy Storage” de uma bateria

Medido em kWh, é uma medida que representa a energia total que pode ser estocada na bateria e assim, dependendo do C-Rate a ser aplicado na bateria, será exercida uma potência diferente na carga ou descarga desta.

3.2. Embarcação

A embarcação utilizada foi objeto de estudo de um outro trabalho, de onde os valores experimentais utilizados foram retirados. Por questões de confidencialidade do projeto, detalhes sobre o trabalho de referência não podem ser compartilhados neste trabalho, e apenas os valores necessários para realização deste projeto foram compartilhados pelo professor orientador, Sergio Leal Braga.

Nesse contexto, a embarcação de referência possui quatro geradores, cada um com 1,550 kWe de potência máxima. Dessa forma, existem diversas configurações possíveis de utilização dos geradores, ou motores, de modo a realizar o movimento da embarcação.

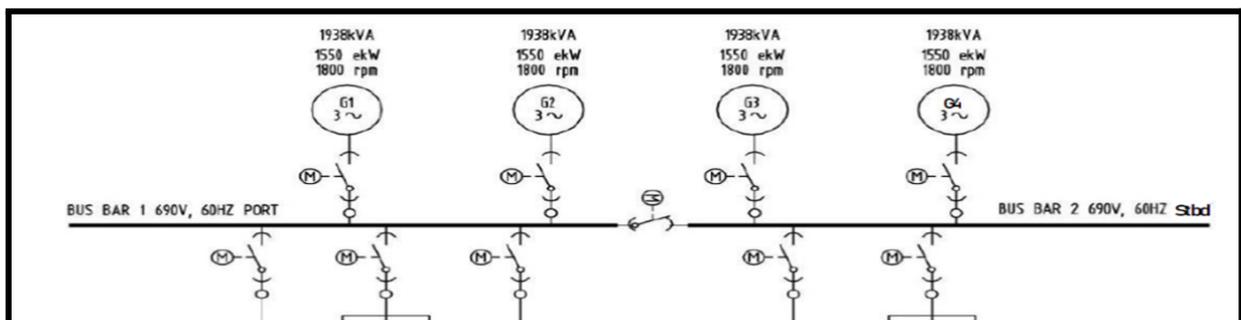


Figura 13: Representação esquemática dos motores da embarcação de referência

3.3. Funcionamento regular

Para a análise da introdução e acoplamento de uma bateria, foi observado inicialmente, para um período específico de funcionamento de aproximadamente três horas, a potência fornecida à embarcação pelos quatro motores em um regime operacional determinado. Dessa forma, identificou-se o seguinte comportamento da potência total dos geradores juntos, com o potência expressa em kW, no eixo vertical.

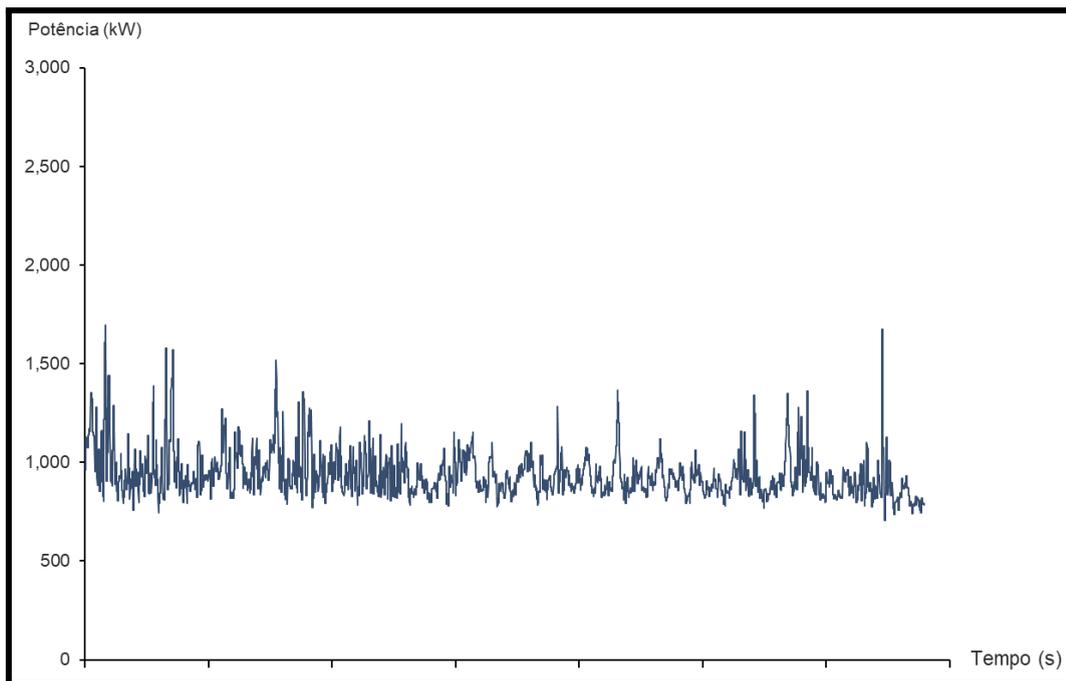


Figura 14: Perfil da potência total fornecida pelos quatro geradores no tempo

Com este funcionamento, possuindo o consumo específico de combustível de cada gerador para cada instante, podemos calcular esta métrica a partir da seguinte equação:

$$SFC = \frac{\sum_{i=1}^4 pot.gerador_i \times SFC_i}{\sum_{i=1}^4 pot.gerador_i}$$

Equação 1: Cálculo do consumo específico de combustível do conjunto de motores a partir dos consumos específicos individuais

Dessa forma, obtemos um perfil relativo ao consumo específico de combustível para o momento analisado, representando o consumo em litros por hora por kW no eixo vertical *versus* o tempo. Este perfil ilustra de maneira clara o objetivo deste trabalho, que é identificar a possível redução deste consumo específico a partir de diferentes aplicações, que serão descritas abaixo.

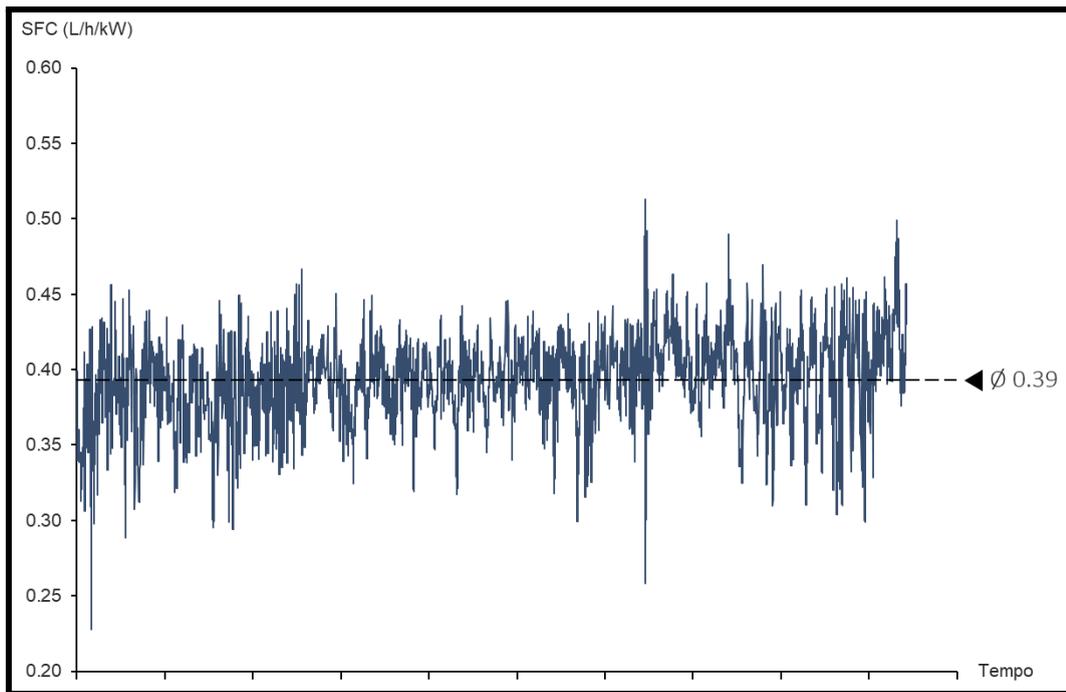


Figura 15: Representação do consumo específico de combustível real ao longo do tempo, em litros por hora por kW.

Ao mesmo tempo, o fabricante da embarcação fornece dados teóricos relativos ao consumo específico de combustível *versus* potência do gerador, de acordo com a tabela a seguir:

Potência [kW]	SFC [L/h/kW]
1,630	0.253
1,467	0.254
1,304	0.259
1,222	0.263
1,141	0.265
978	0.266
815	0.262
652	0.270
489	0.286
408	0.299
326	0.323
163	0.446

Tabela 2: Dados do fornecedor da relação entre potência de cada motor e o consumo específico de combustível

Dessa forma, é possível aproximar-se da curva que representa a relação entre os dois parâmetros:

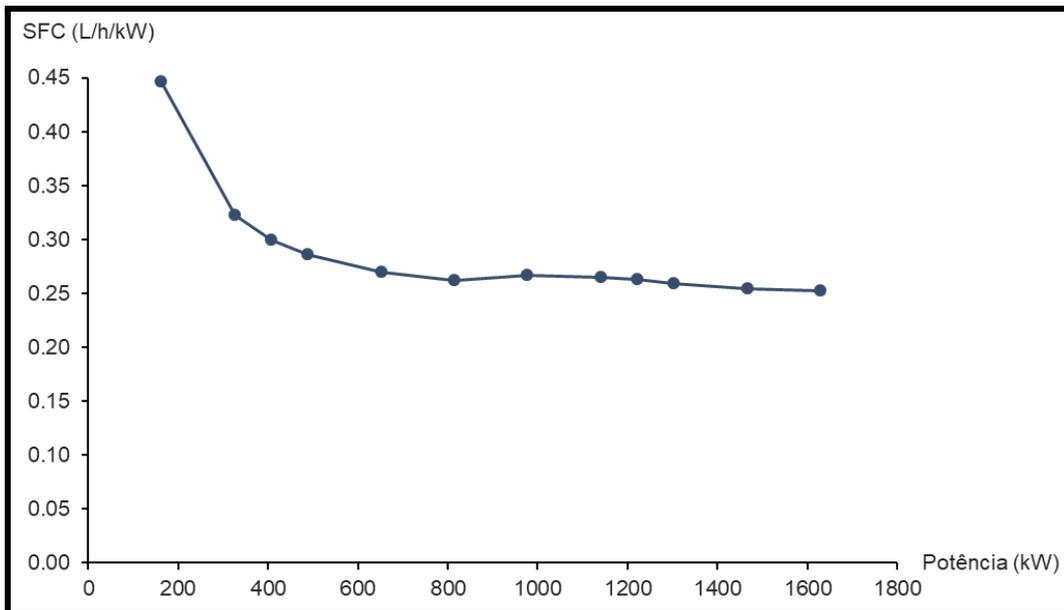


Figura 16: Representação gráfica de SFC versus Potência de um motor

Nesse contexto, a principal hipótese tratada neste trabalho será relativa à variação entre o *Specific Fuel Consumption* real e teórico avaliados, e a implementação de medidas para aproximação das duas curvas. Dessa forma, será possível a realização da estimativa de economia máxima de combustível a partir do resultado encontrado, realizando cenários de utilização de quantidades de motores diferentes em atividade.

3.4. *Peak-shaving*

O objetivo deste estudo é entender a aplicação do *peak-shaving* na embarcação de referência, avaliando os ganhos financeiros e ambientais a partir da redução de consumo. Nesse contexto, o *peak-shaving* é representado pela implementação de baterias para utilização em momentos de consumo acima do médio. Dessa forma, a bateria funciona

como um fornecedor de energia em momentos onde a demanda aumenta, e utiliza a energia liberada pelos motores em um momento de menor demanda, sendo assim carregada [7]. Este processo permite fornecer uma potência mais regular aos motores da embarcação, reduzindo os picos, e logo o consumo de combustíveis. No caso estudado, o funcionamento seria semelhante ao expresso na imagem abaixo:

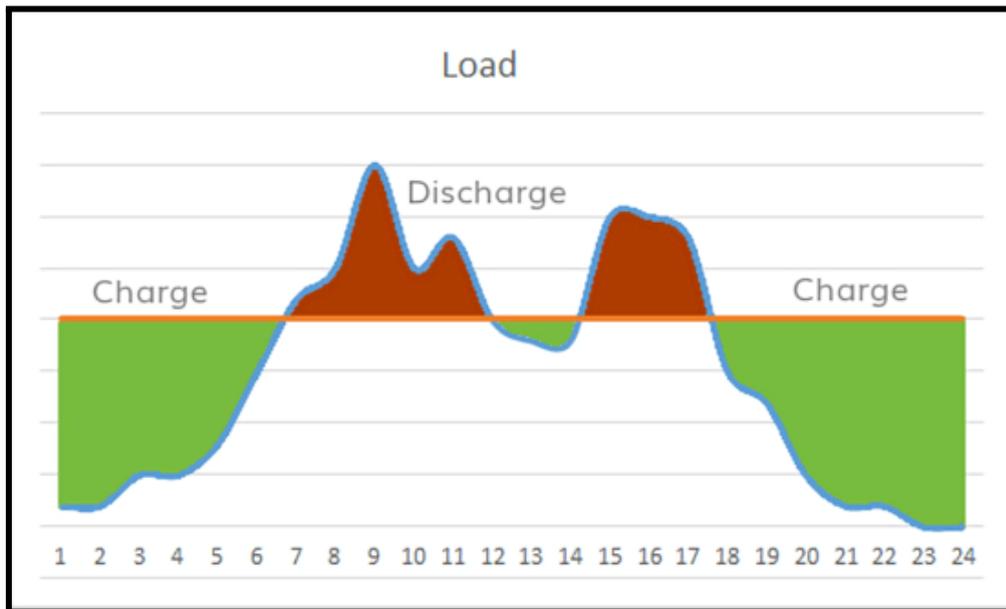


Figura 17: Exemplo ilustrativo do acoplamento de uma bateria para realização do peak-shaving na embarcação [8]

Conforme observado acima, é possível entender que a atividade da bateria se altera de acordo com a potência que está sendo demandada dos motores.

Para a implementação deste, é necessário o cálculo da potência que deverá ser fornecida pela bateria, a partir da equação:

$$P(t) = \overline{P(t)} + P_B(t)$$

Onde $P_B(t)$ representa a potência a ser fornecida ou absorvida pela bateria, e $\overline{P(t)}$ representa a média móvel da potência total fornecida por todos os motores em funcionamento. Dessa forma, o fornecimento de energia pelos motores seguindo essa média irá reduzir o

perfil repleto de picos, enquanto a bateria será responsável por fornecer a energia nesses momentos.

Neste trabalho, serão abordados resultados utilizando médias móveis relativas a 50, 100 e 200 segundos, para finalmente utilização do cálculo utilizando uma média simples. Desse modo, interpretações em relação a esta medida também poderão ser observadas.

3.5. Cálculo da economia de combustíveis

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo da aplicação do *peak-shaving* é o entendimento de que a alta variação, ou seja, os picos de demanda de energia compõem um dos principais fatores de afastamento entre o consumo específico de combustível teórico e real. Dessa forma, como os dados obtidos refletem a utilização dos quatro motores da embarcação em atividade, estaremos realizando o cálculo inicialmente considerando a potência dos geradores como a média móvel dividida igualmente entre os quatro motores, para em seguida avaliarmos como seria o funcionamento com dois, e apenas um gerador em atividade.

Dessa forma, conforme avaliado na Tabela 2 e na Figura 16, possuímos a relação teórica entre o consumo específico de combustível e a potência para cada um dos geradores. De mesmo modo, de forma a simplificar a relação, podemos também encontrar uma função que relacione o consumo de combustível em litros por hora com a potência, a partir da realização de uma regressão, que nos fornece o seguinte:

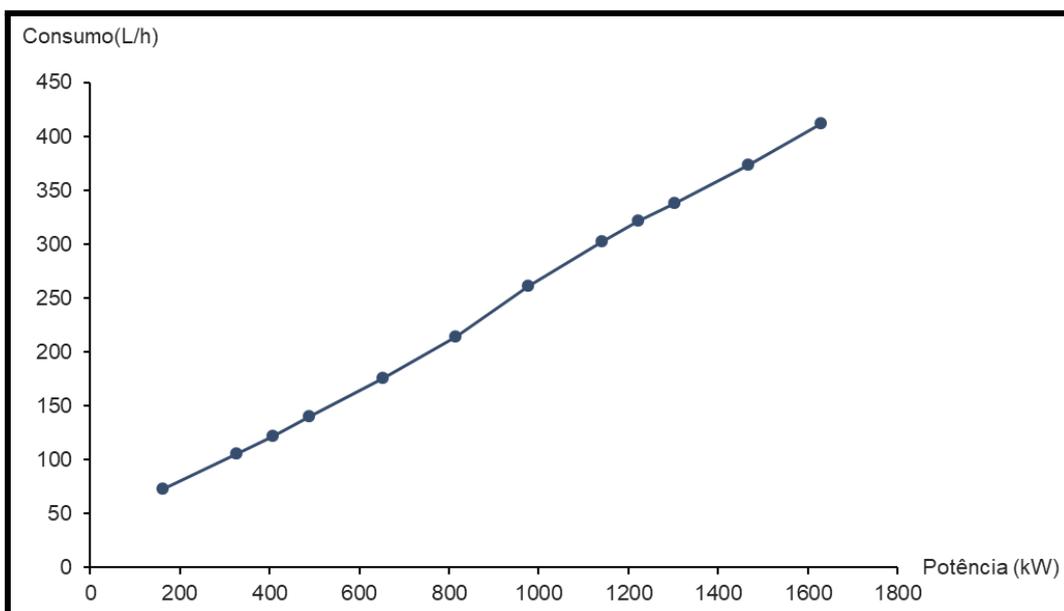


Figura 18: Relação entre consumo (L/h) e Potência por gerador (kW)

Nesse contexto, esta relação será utilizada para calcular a potencial economia de combustíveis em cada um dos casos analisados, seguindo a hipótese de aproximação da curva teórica.

A partir disto, podemos aplicar esta relação para a média móvel de potência fornecida pelos motores, dividida pela quantidade de motores em atividade que gostaríamos de avaliar, e realizar a comparação com os dados reais obtidos. Inicialmente, utilizando a comparação com os dados que obtivemos, relativos ao movimento com quatro motores em atividade, observa-se na Figura 15 que o consumo específico de combustível variava em torno de 0,39 litros por hora por kW.

3.6. Estudo da bateria a ser implementada

A partir do cálculo realizado para o *peak-shaving*, explicado no item anterior e desenvolvido no capítulo de resultados, temos a potência que será demandada da bateria a cada instante, e portanto é possível realizar análises relativas às características importantes na escolha desta. Neste caso, para estar conforme os estudos já realizados anteriormente, estaremos avaliando baterias entre 100 e 600 kWh, com *C-Rates* entre

um e seis, de modo a entender o máximo de potência que estas podem executar, conforme demonstrado na tabela abaixo:

		Energy Storage (kWh)					
		100	200	300	400	500	600
C-Rate	1	100	200	300	400	500	600
	2	200	400	600	800	1,000	1,200
	3	300	600	900	1,200	1,500	1,800
	4	400	800	1,200	1,600	2,000	2,400
	5	500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000
	6	600	1,200	1,800	2,400	3,000	3,600

Tabela 3: Potência a partir dos Energy Storage e C-Rate da bateria

Com isso, podemos realizar o cruzamento entre a potência necessária pela bateria a ser acoplada, e os diferentes *Energy Storages*, de 100 a 600 kWh, para calcular o *C-Rate* necessário à bateria em cada instante.

Dessa forma, obtemos seis curvas diferentes para cada média móvel aplicada, que para cada capacidade de estocagem de energia fornece o perfil do *C-Rate* e, a partir disso pode-se iniciar a análise das características necessárias da bateria e quais são os *C-Rates* e *Energy Storages* que atendem a esta demanda.

Para referência, o cálculo deste indicador é realizado pela divisão entre a potência necessária ou fornecida pela bateria dividida pelo *Energy Storage* em questão. Os perfis encontrados de *C-Rate*, assim como as comparações entre eles serão apresentados no capítulo de resultados.

A partir dos estudos e resultados referentes ao *C-Rate* da bateria necessária, será possível entender, dentro do universo de características representado pela tabela 3, quais baterias conseguem atender a necessidade imposta pela operação.

Em seguida, além dos pontos já observados em relação à bateria, também convém entender, para cada bateria, o quanto esta conseguiria alimentar a embarcação sozinha. Dessa forma, para analisar isto, cabe

identificar inicialmente quais baterias têm capacidade de fornecer o máximo de potência demandado pela embarcação no período observado, para em seguida entender o tempo que cada uma destas consegue alimentar o navio, a partir do início do período de observação.

Dessa forma, a autonomia da bateria também pode ser utilizada como critério de escolha do equipamento a ser acoplado junto aos geradores, conforme será explorado ao longo dos próximos capítulos.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados relativos ao desenvolvimento explicitado no item 3 serão expostos, de modo a embasar as conclusões do próximo capítulo.

4.1. Aplicação do *peak-shaving*

A partir da aplicação das diferentes médias móveis definidas, obtém-se curvas diferentes para a potência fornecida pelos motores e pela bateria acoplada, conforme demonstrado nos gráficos abaixo:

a. Média móvel em 50 segundos

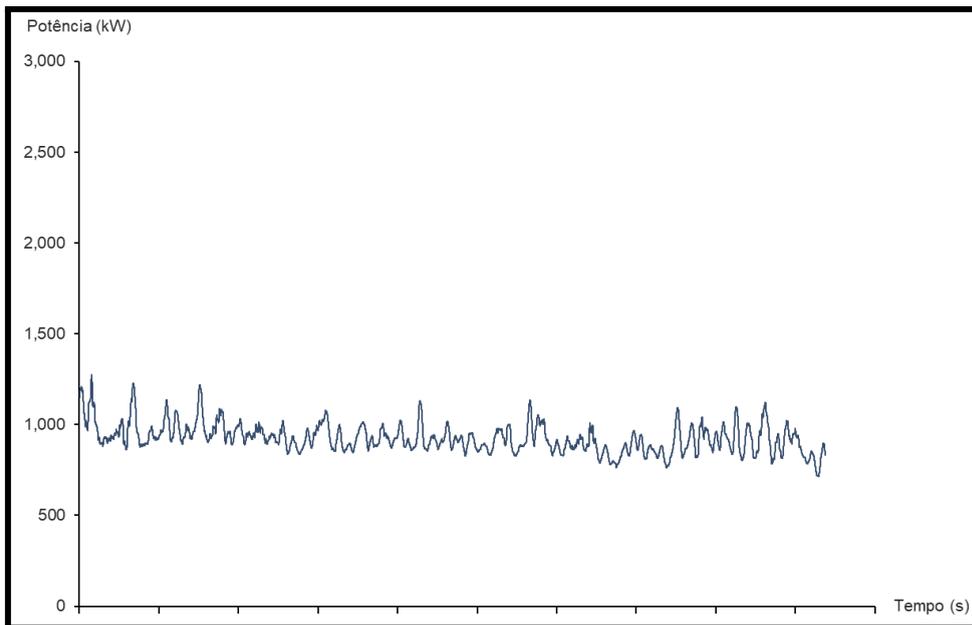


Figura 19: Média móvel (50s) da potência fornecida pelos quatro geradores

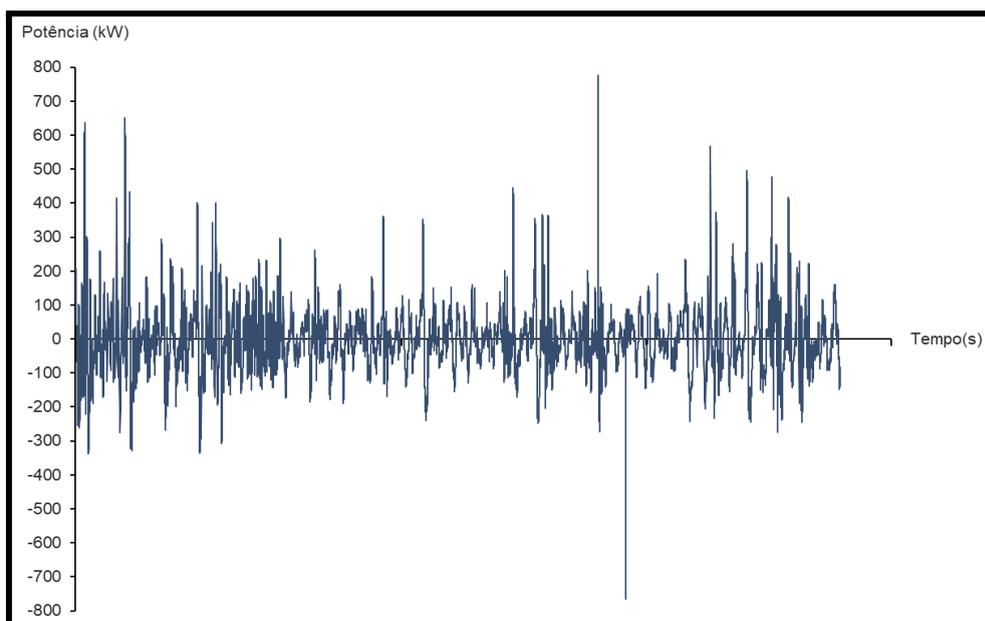


Figura 20: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média móvel em 50s

b. Média móvel em 100 segundos

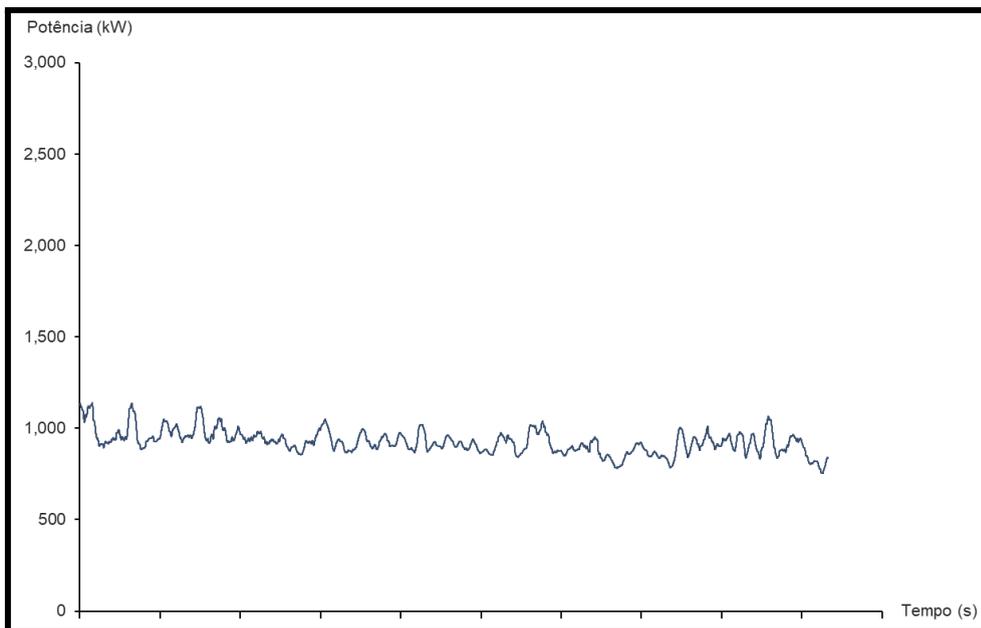


Figura 21: Média móvel (100s) da potência fornecida pelos quatro geradores

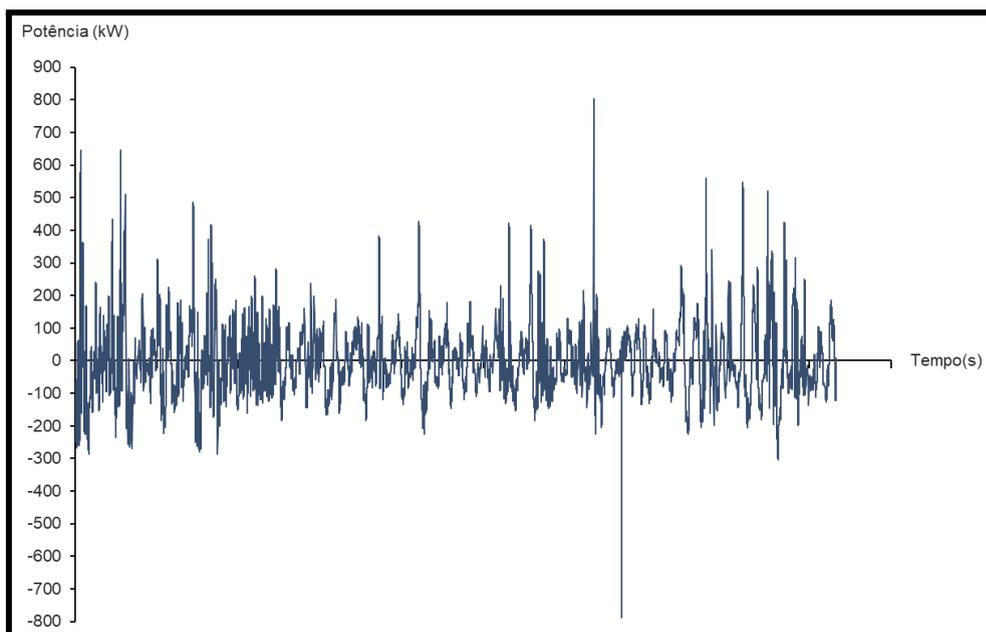


Figura 22: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média móvel em 100s

c. Média móvel em 200 segundos

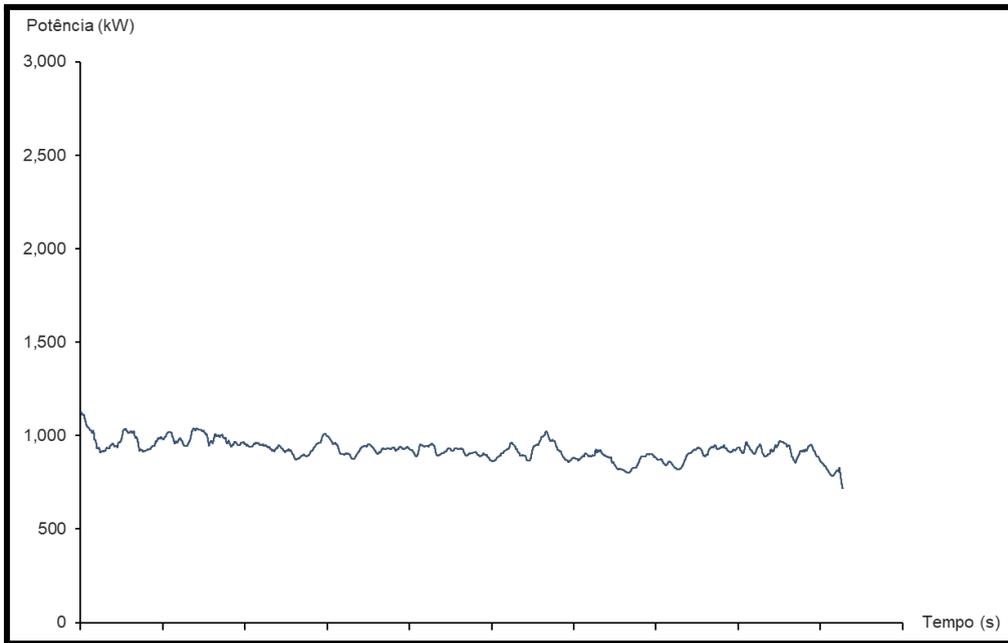


Figura 23: Média móvel (200s) da potência fornecida pelos quatro geradores

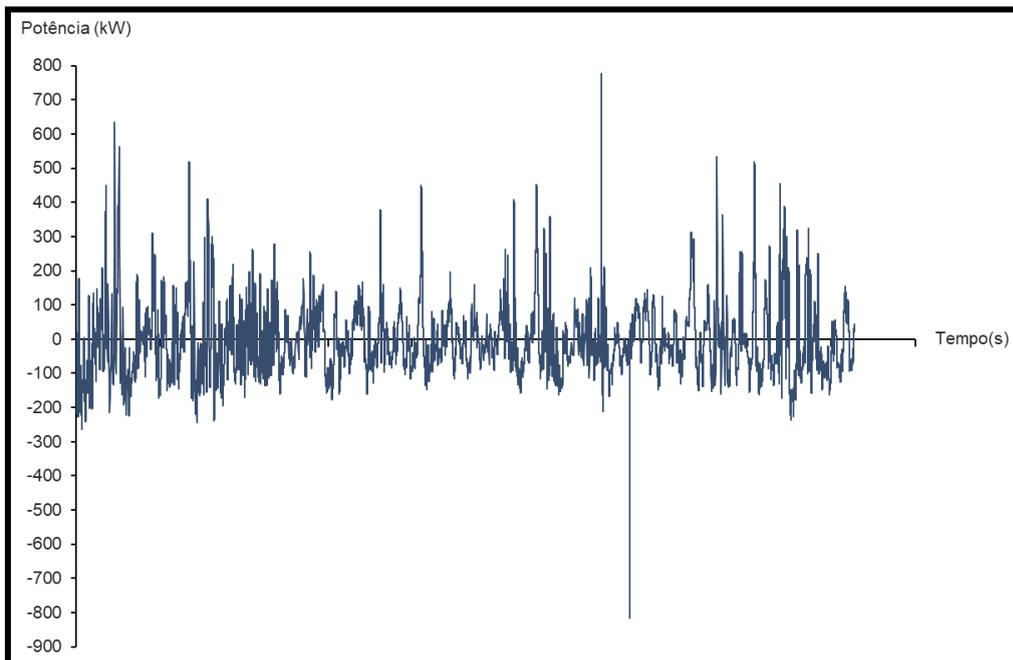


Figura 24: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média móvel em 200s

d. Média simples de todo o período

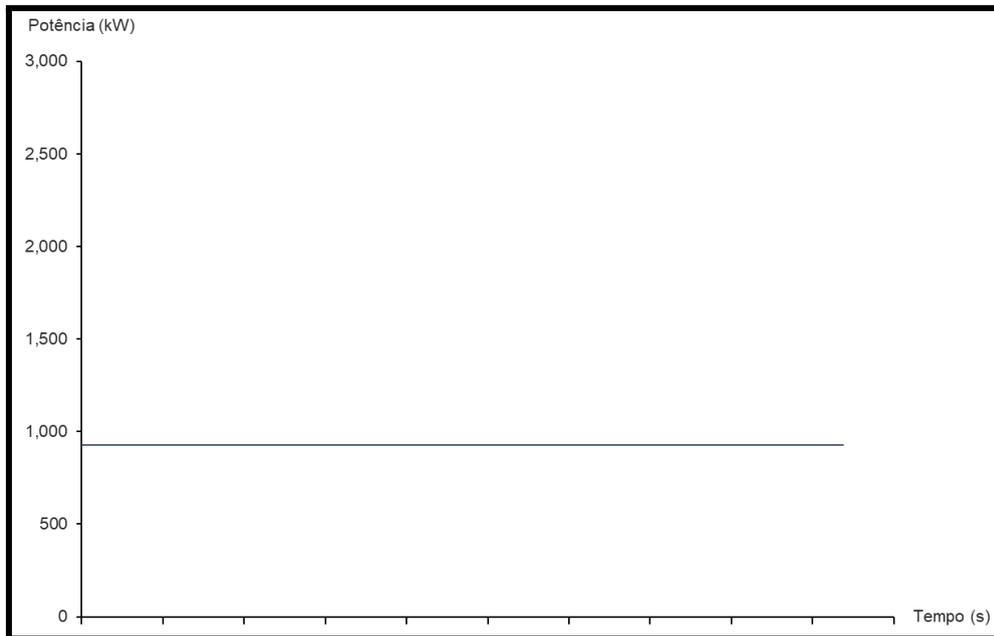


Figura 25: Média simples da potência fornecida pelos quatro geradores

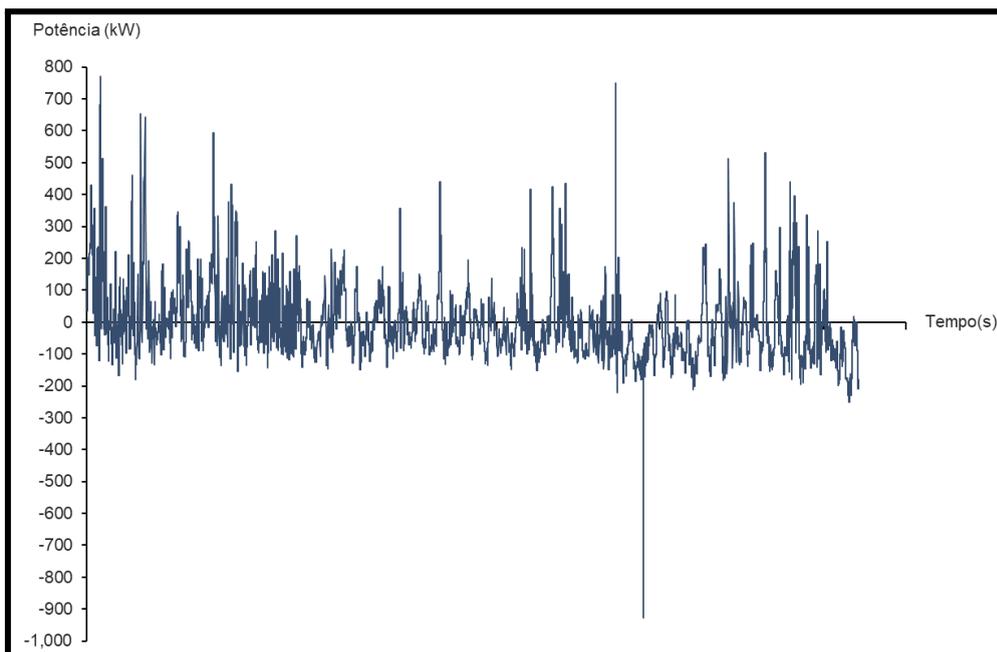


Figura 26: Potência necessária ou fornecida da bateria - Média simples

Dessa forma, como podemos perceber para todos os casos, a bateria representa a diferença da média móvel com o total de potência fornecido. Por outro lado, a escolha do valor de intervalo utilizado para a média altera significativamente o perfil de potência tanto do motor, quanto da bateria.

Comparando os quatro casos observados nas figuras acima, temos que o aumento do intervalo da média móvel reduz intensamente a variação, ou *peaks*, do perfil da potência dos motores da embarcação. Por exemplo, temos a seguinte variância total para os diferentes intervalos explorados:

Intervalo Média (s)	Variância
50	6413.8
100	4178.4
200	2626.4
Média Simples	0.0

Tabela 4: Variância da potência fornecida pelo motor em relação à média móvel aplicada

Observa-se que, conforme o intervalo da média móvel é maior, reduz-se a variância da medida de potências fornecidas pelo motor, uma vez que as variações são cada vez mais supridas ou absorvidas pela bateria, e não mais pelos geradores.

Em relação à potência da bateria, conforme comentado acima, o efeito é inverso ao efeito da potência dos motores, mas ainda assim, dado que esta terá o mecanismo de carga e descarga com as variações e estará representando a diferença de demanda com a média utilizada, é esperado que, com o aumento do intervalo da média aplicado, as variações de carga da bateria sejam mais acentuadas. Por referência, abaixo encontramos o *State of Charge* de uma bateria de 100 kWh para aplicação no regime descrito onde, com uma carga inicial de 80% do total,

vemos que durante todo o período de observação, a bateria se comporta do seguinte modo para cada uma das médias utilizadas:

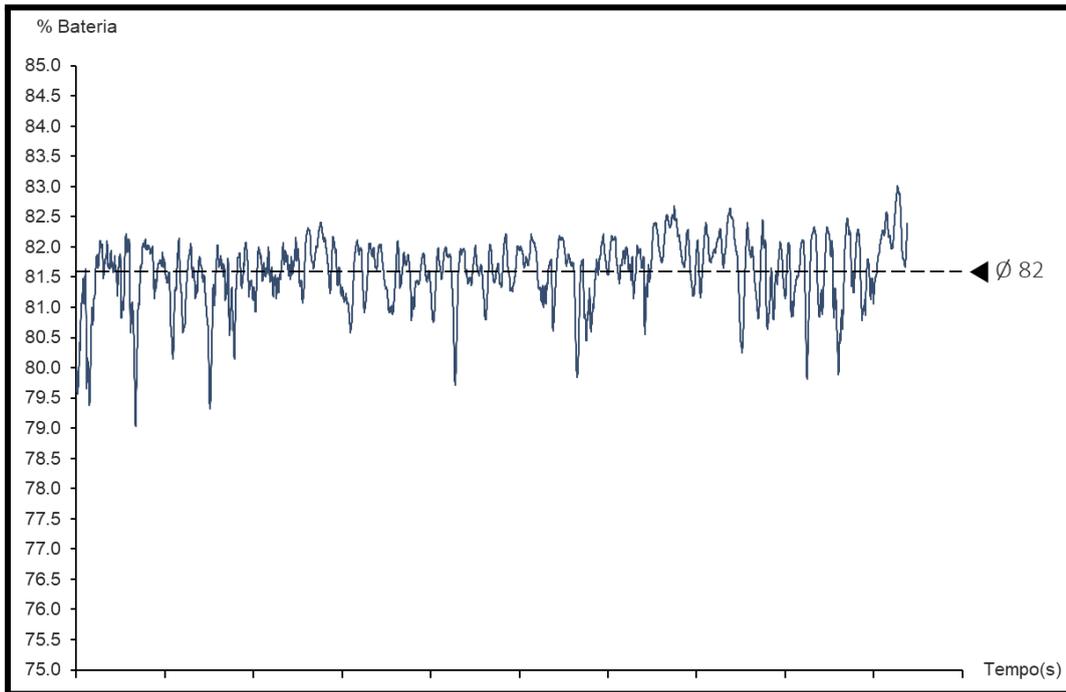


Figura 27: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média móvel 50s

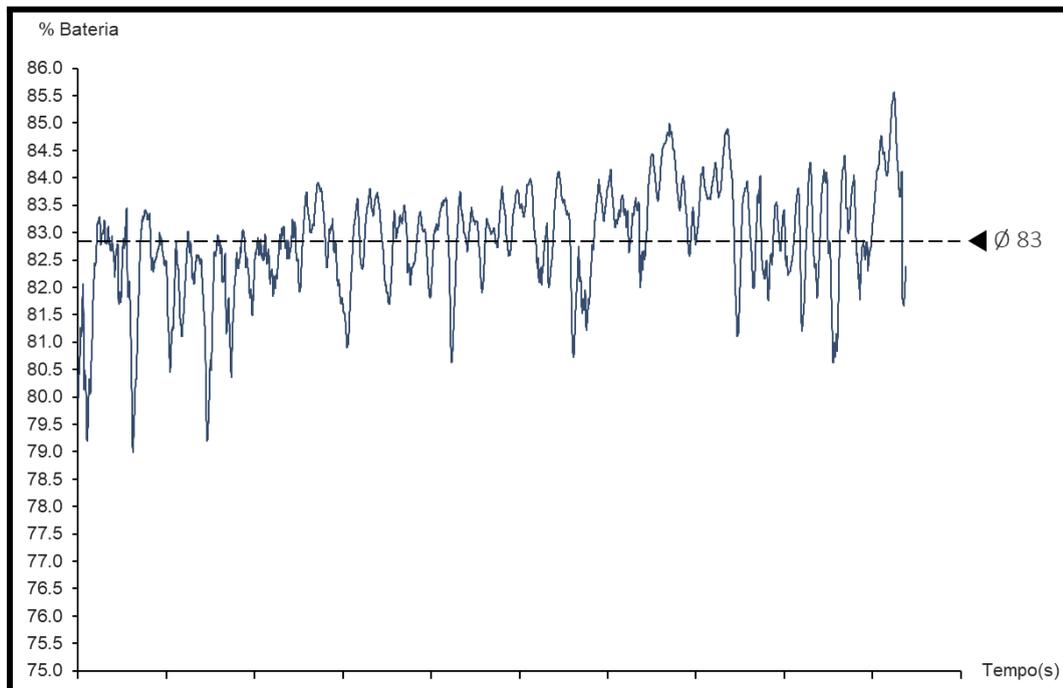


Figura 28: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média móvel 100s

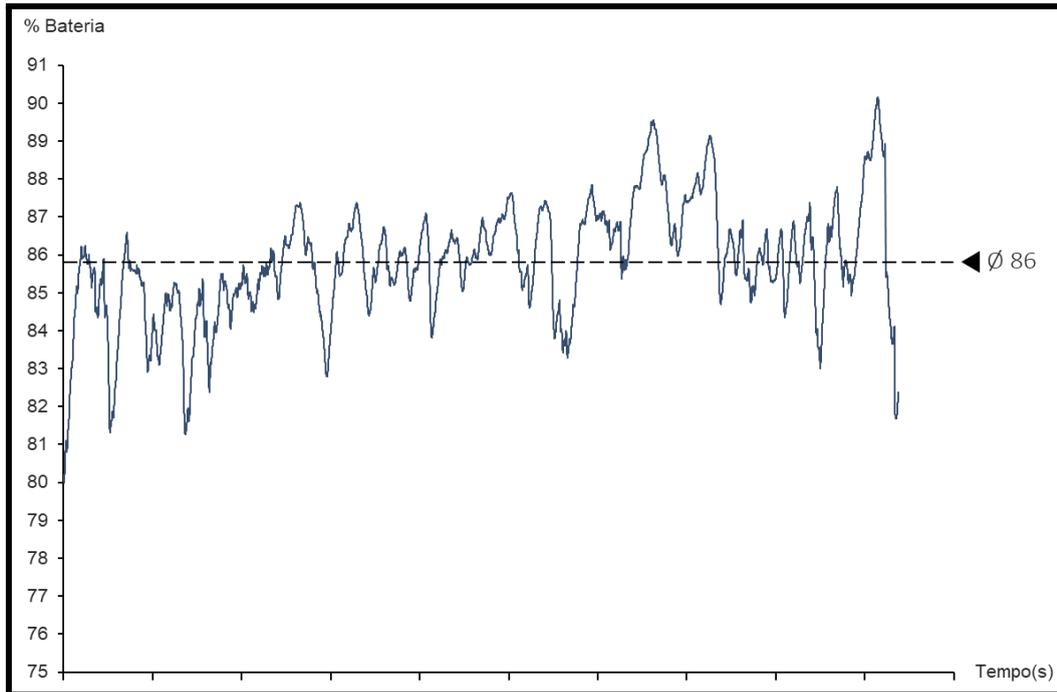


Figura 29: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média móvel 200s

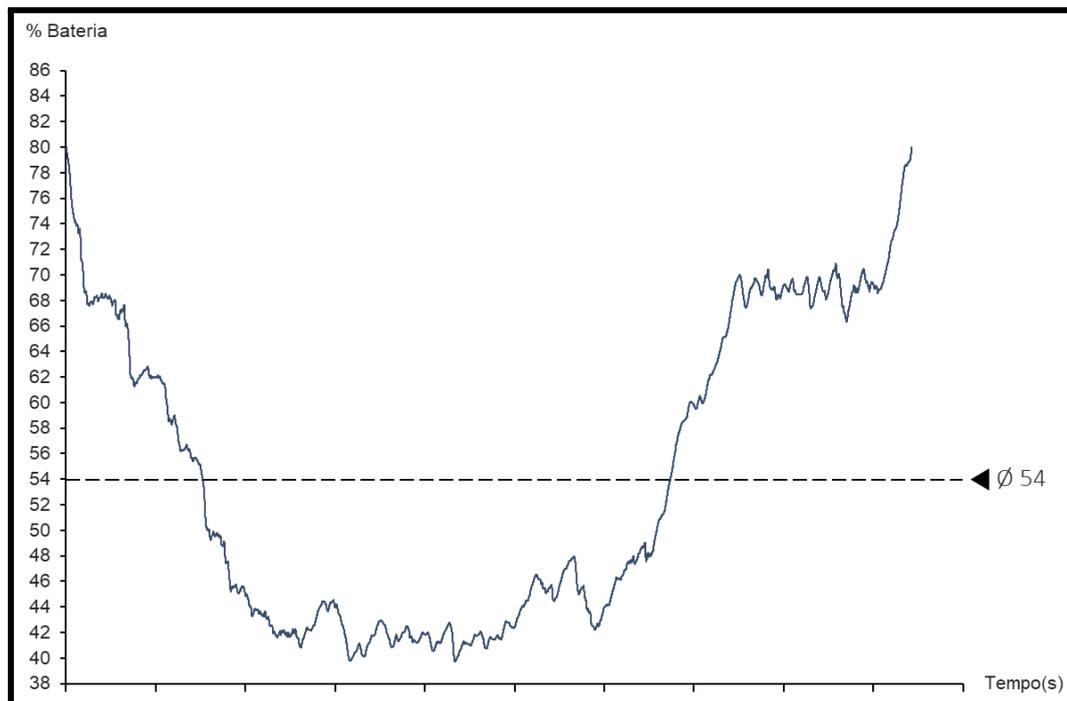


Figura 30: State of Charge de uma bateria na aplicação do peak-shaving para o período observado - Média simples

Dessa forma, as figuras acima ilustram a acentuação do fenômeno de carga e descarga da bateria acoplada, com o caso mais extremo

representado na figura 30, onde a média simples reduz ao máximo a variação da potência dos geradores, ao mesmo tempo que demanda muito mais da bateria. Além disso, um resultado interessante é o que demonstra o aumento da média de carga da bateria com a passagem da média móvel de 50 segundos para 200, podendo ser um indicador para utilização do maior valor de média, por exemplo.

4.2. Economia de combustíveis

A partir dos dados teóricos fornecidos em relação ao consumo de combustível de cada gerador em relação à potência fornecida por estes, é possível calcular a potencial economia de combustíveis a partir da aplicação do *peak-shaving*, explicado acima, para cada um dos casos estudados neste trabalho.

A visualização da figura 31, utilizada com a média móvel de 50 segundos para exemplificação, permite entendimento inicial sobre tal redução:

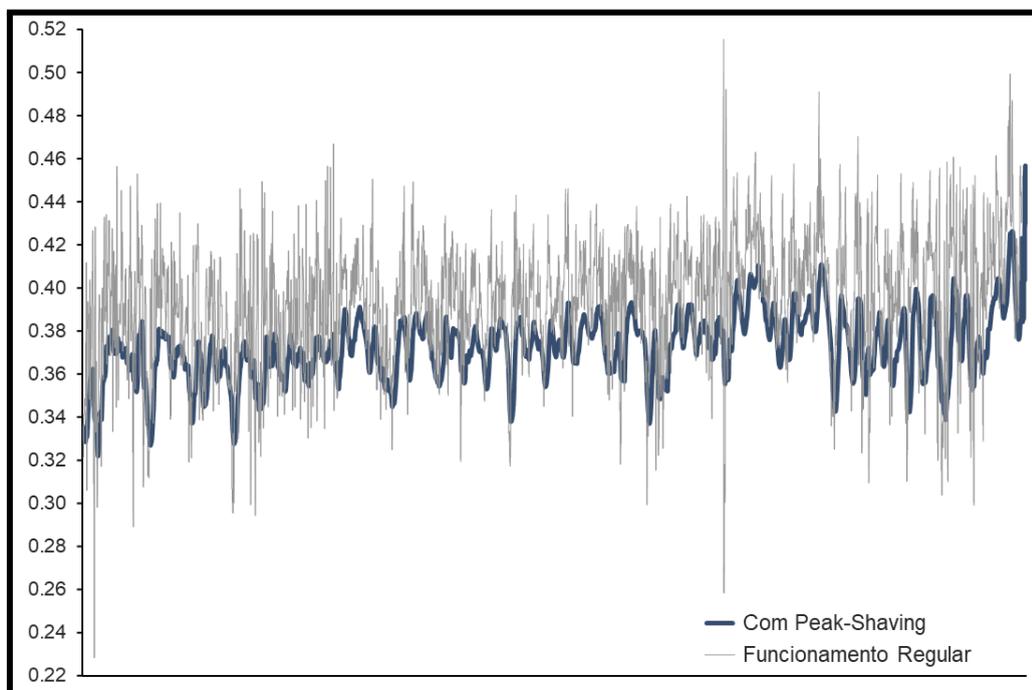


Figura 31: Comparação do consumo específico de combustível entre o funcionamento regular da embarcação e com a aplicação do *peak-shaving*

Dessa forma, é possível ver o ganho evidente com menor consumo de combustível, pois observa-se como a curva azul, representando o método aplicado, encontra-se abaixo da curva cinza, que representa o funcionamento normal observado, idêntico à figura 15, de onde os dados experimentais foram retirados. Além disso, entendendo a relação expressa na figura 16, é razoável prever que a redução do número de motores em funcionamento também geraria ganhos com o gasto de combustíveis, uma vez que cada um deles estaria fornecendo maior potência, e logo menor consumo específico de combustível.

A partir destes resultados preliminares, o cálculo da economia total pode ser realizado, entendendo a vantagem obtida com a implementação do método, baseado na comparação ainda com atividade dos quatro geradores da embarcação, conforme indicado abaixo:

Operação	Consumo Total de Combustível (L)
Regular	930.37
Média Móvel 50s	878.34
Média Móvel 100s	878.58
Média Móvel 200s	879.25
Média Simples	879.48

*Tabela 5: Comparação de consumo de combustível em relação com a aplicação do *peak-shaving**

De acordo com o resultado acima, observa-se que o consumo total de combustível da embarcação é reduzido em aproximadamente 5,5% (ou 51 litros) com a aplicação do *peak-shaving*, independente da média utilizada. Ao mesmo tempo, observa-se uma pequena diferença de consumo em relação ao intervalo utilizado para o método, demonstrando ligeiro aumento do consumo com utilização de maiores períodos de média.

Em seguida, também mostra-se interessante a análise do fenômeno com a redução do número de motores em atividade. Isso se dá pelo fato de que a relação expressa na figura 16 prevê uma queda relevante no

consumo específico de combustível com o aumento da potência. Dessa forma, a redução do número de geradores em atividade aumentaria a potência demandada por cada um deles, reduzindo assim o consumo específico.

Nesse contexto, foi realizada também uma comparação do consumo total de combustíveis com e sem a aplicação do método do *peak-shaving* entre diferentes números de geradores ativos, conforme ilustra a tabela abaixo:

Operação	Média Móvel 50s	Média Móvel 100s	Média Móvel 200s	Média Simples
4 Geradores Ativos	878.34	878.58	879.25	879.48
2 Geradores Ativos	681.65	681.93	682.72	682.97
1 Gerador Ativo	627.30	627.80	628.81	629.33

Tabela 6: Comparação de consumo de combustível em relação com a aplicação do peak-shaving e número de geradores

4.3. Bateria a ser implementada

a. C-Rate da bateria

Conforme explicado anteriormente no capítulo de metodologia, abaixo encontram-se os seis gráficos relativos ao *C-Rate* necessário à bateria para o período observado. Deixando todos os seis gráficos na mesma escala para comparação, os valores utilizados nesta seção são relativos ao *C-Rate* demandado da bateria no caso da média móvel com utilização do intervalo de 50s. Dessa forma, os gráficos relativos às medidas restantes não estão presentes neste documento, uma vez que o efeito de comparação entre cada um dos seis gráficos de cada conjunto é muito semelhante, independente da média utilizada.

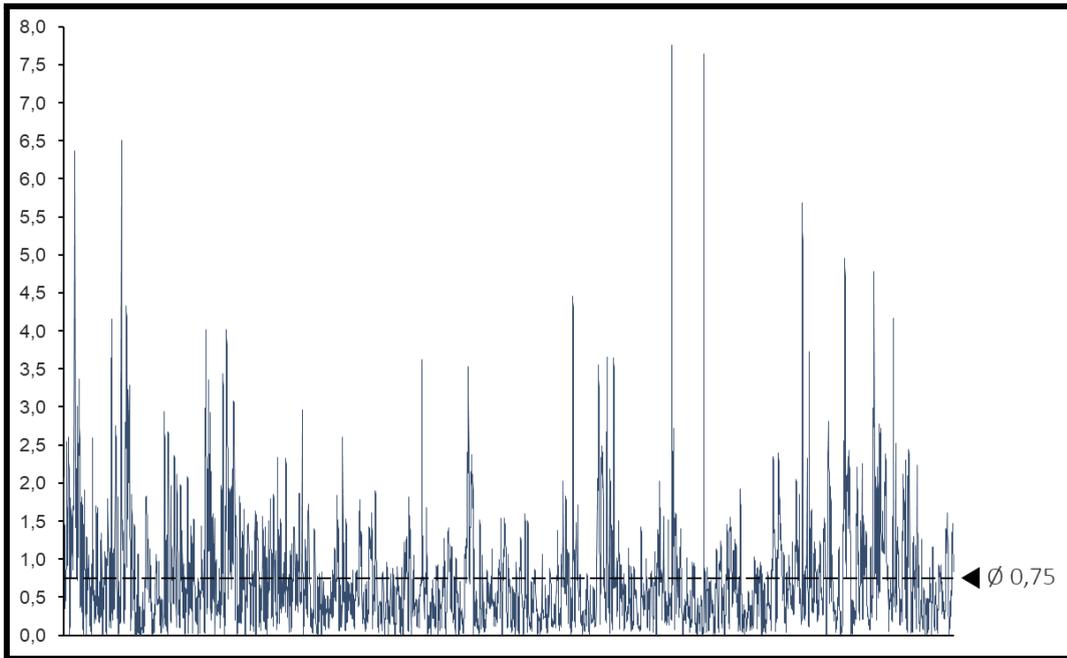


Figura 32: C-Rate(t) para uma bateria de 100 kWh

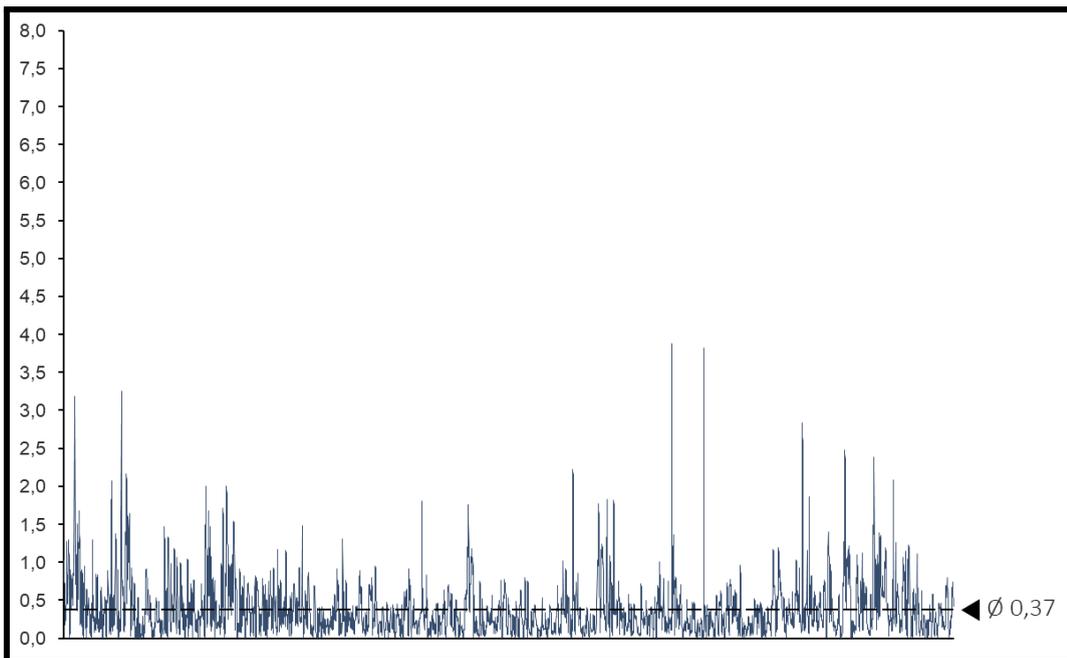


Figura 33: C-Rate(t) para uma bateria de 200 kWh

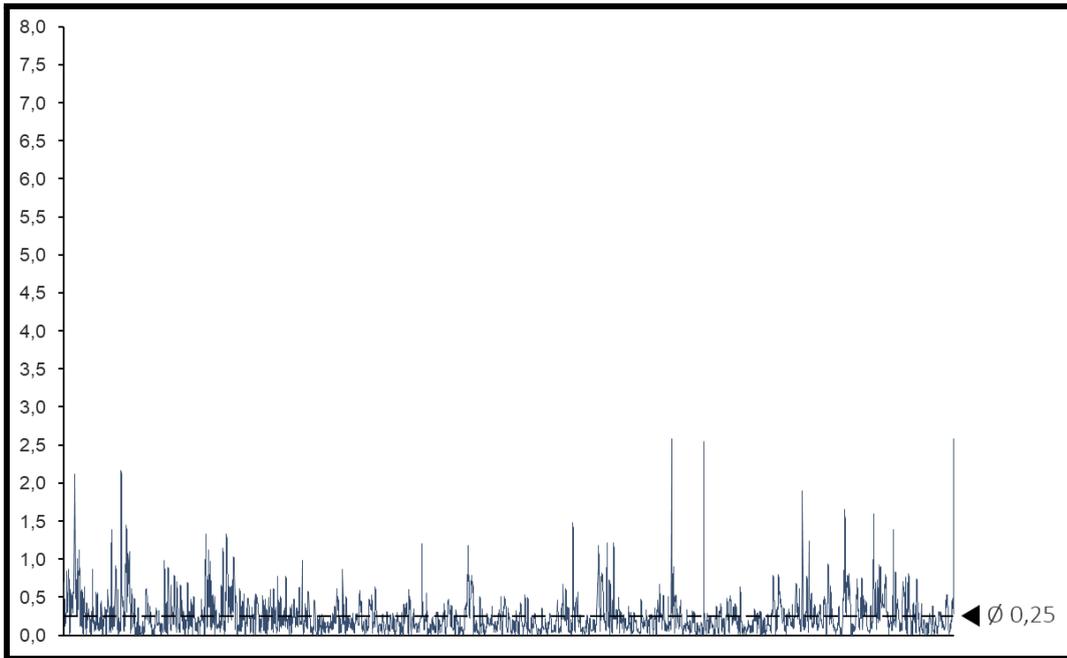


Figura 34: C-Rate(t) para uma bateria de 300 kWh

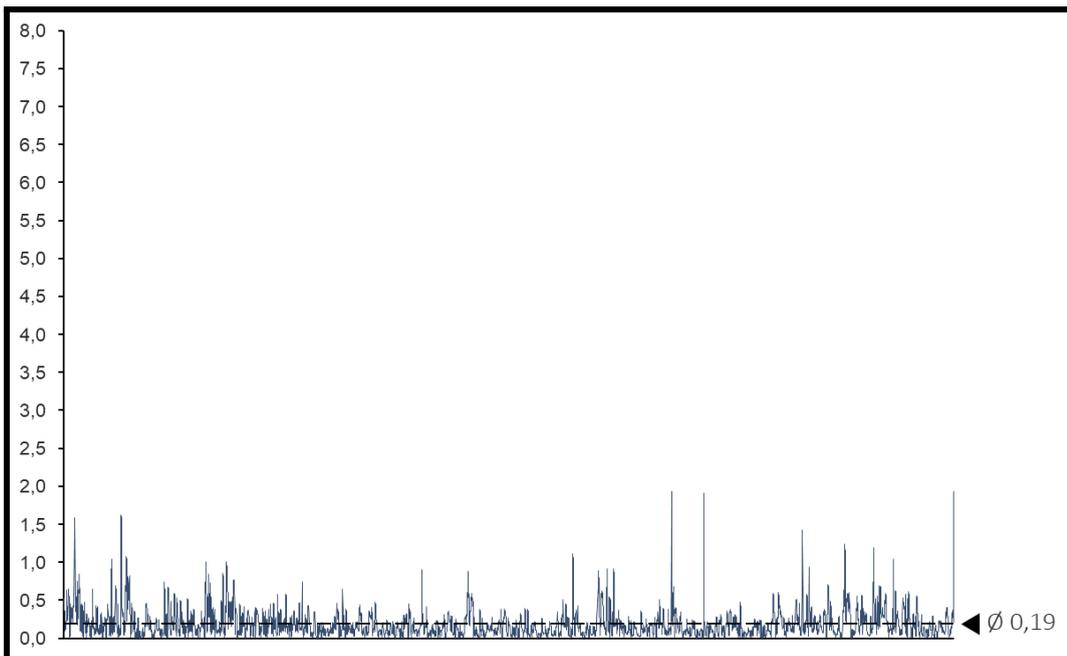


Figura 35: C-Rate(t) para uma bateria de 400 kWh

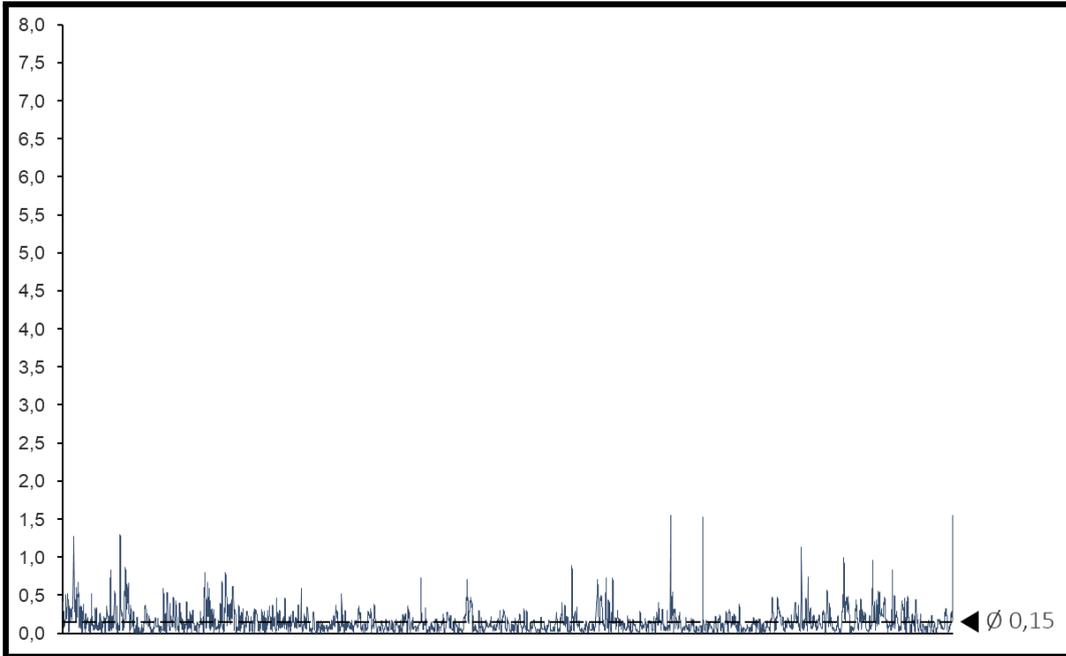


Figura 36: C-Rate(t) para uma bateria de 500 kWh

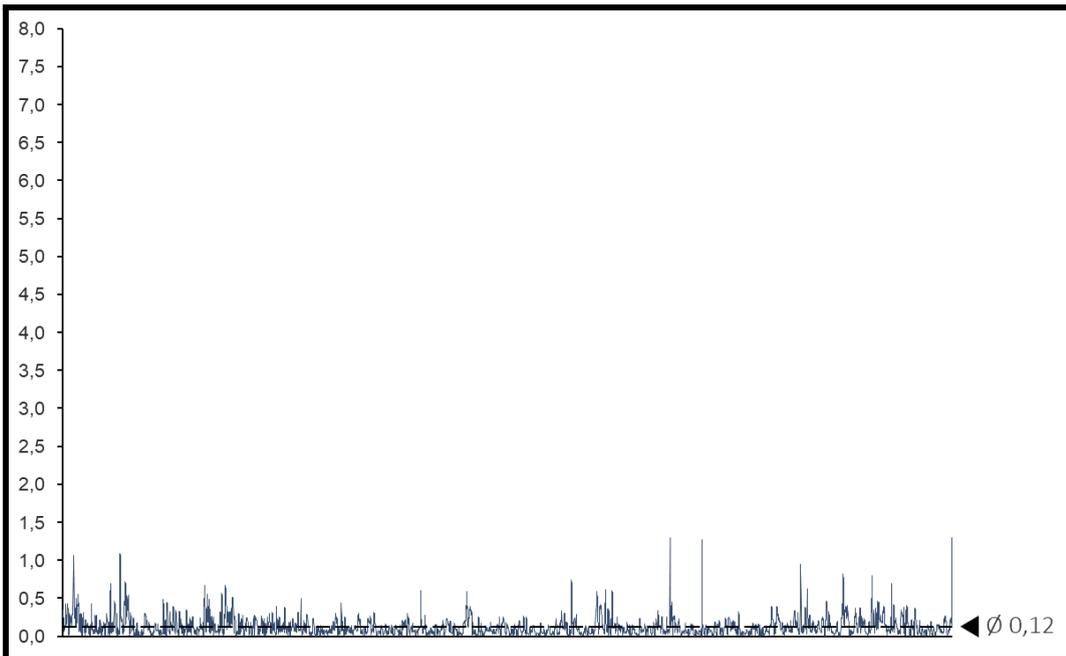


Figura 37: C-Rate(t) para uma bateria de 600 kWh

A partir dos gráficos acima, entende-se como a necessidade de um maior *C-Rate* diminui na medida em que aumentamos a capacidade de estocagem da bateria. Além disso, torna-se interessante também a visualização dos resultados segundo a tabela a seguir, que explora o *C-Rate* máximo necessário para cada capacidade de bateria analisada.

Storage (kWh)	C-Rate Max			
	50s	100s	200s	Média
100	7.76	8.04	8.15	9.25
200	3.88	4.02	4.07	4.63
300	2.59	2.68	2.72	3.08
400	1.94	2.01	2.04	2.31
500	1.55	1.61	1.63	1.85
600	1.29	1.34	1.36	1.54

Tabela 7: C-Rate máximo por estocagem de bateria

Nesta última visualização, é possível obter algumas conclusões iniciais sobre as características da bateria a ser utilizada:

- a. As baterias de 100 kWh não são suficientes para a demanda de energia observada, dado que não estamos considerando baterias com *C-Rate* acima de 6, principalmente por conta de seu alto custo.
- b. Conforme aumenta-se o período de aplicação da média móvel, aumenta-se a necessidade de *C-Rate* da bateria. Este fenômeno já era esperado, uma vez que tal aumento reduz as variações de potência dos geradores, as transferindo para a bateria.
- c. As estocagens de 400, 500 e 600 kWh possuem *C-Rate* máximo entre 1 e 2,5, o que pode indicar inicialmente para uma escolha pela bateria de 400 kWh, dado que deverá ser escolhida uma bateria com, no mínimo, *C-Rate* 2, e a capacidade menor será a mais barata. Note que este valor máximo de *C-Rate* considera capacidade máxima da bateria.
- d. Finalmente, observando o máximo de potência demandado da bateria ao longo do período analisado, conforme indicado na tabela abaixo, é possível reformular a Tabela 3, com indicações em relação ao atendimento da necessidade.

Média	Potência Máxima (kW)
50s	776
100s	804
200s	777
Simplex	770

Tabela 7: Potência máxima demandada pela bateria

Considerando uma margem de 20%, pois sabemos que a bateria não conseguirá trabalhar com toda a sua capacidade, encontramos o seguinte cenário, onde os valores em vermelho representam casos onde a demanda não é atendida, valores em laranja atendem a demanda porém com pouca sobra, podendo ocorrer falhar, e os valores em verde representam uma margem segura para garantir atendimento da demanda.

		Energy Storage (kWh)					
		100	200	300	400	500	600
C-Rate	1	100	200	300	400	500	600
	2	200	400	600	800	1,000	1,200
	3	300	600	900	1,200	1,500	1,800
	4	400	800	1,200	1,600	2,000	2,400
	5	500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000
	6	600	1,200	1,800	2,400	3,000	3,600

Tabela 9: Classificação dos valores da Tabela 3, em relação ao atendimento da demanda.

Dessa forma, utilizando uma margem de segurança, nosso resultado preliminar indica que 13 das 36 baterias estariam aptas a operar para realização do *peak-shaving*, descrito anteriormente. Nos próximos itens, introduziremos novas condições que irão auxiliar no entendimento de mais características para a escolha da bateria.

b. Autonomia da bateria

Conforme mencionado anteriormente, um outro critério interessante para análise é a capacidade de alimentação autônoma da bateria para a embarcação. Para o intervalo utilizado, o máximo de potência fornecido pelos quatro motores juntos foi de 1,695 kW, o que representa que a bateria deveria ter capacidade para fornecer essa potência para conduzir a embarcação de modo autônomo.

Considerando este critério, algumas das baterias assinaladas em verde na tabela 9 deixam de se enquadrar, e apenas as baterias com o mínimo de 1,800 kW de potência se tornam opções, isto é, baterias com no mínimo 300 kWh.

Neste contexto, o gráfico abaixo demonstra o *State of Charge* de baterias com 300, 400, 500 e 600 kWh, e o tempo que resistiriam para alimentação da embarcação de modo unicamente elétrico, partindo de uma carga de 80% do total

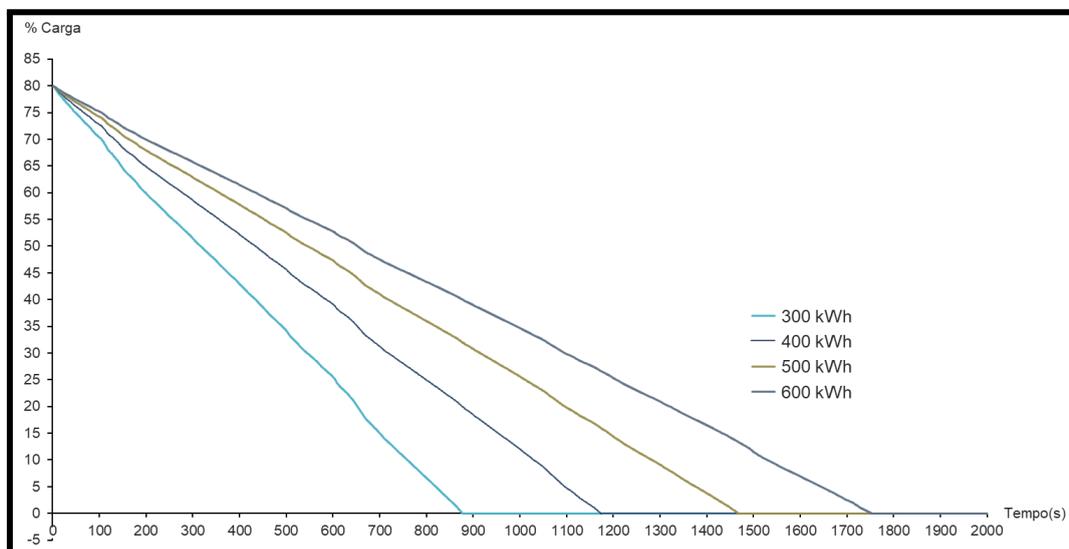


Figura 38: *State of Charge* de baterias como única fonte de alimentação da embarcação

No gráfico acima, fica claro o quanto as baterias analisadas não são suficientes para a operação da embarcação, uma vez que cada uma delas só é capaz de resistir ao período observado pelo tempo descrito abaixo:

Capacidade (kWh)	Tempo de Autonomia (Min)
300	14.6
400	19.5
500	24.5
600	29.2

Tabela 10: Tempo de autonomia de baterias de acordo com a capacidade total de estocagem

A partir das análises efetuadas, é possível obter-se mais embasamento para a escolha, que será aprofundada no próximo capítulo, de conclusões e perspectivas.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1. Estudo da economia de combustíveis

A partir dos resultados calculados em relação à possível economia de combustíveis, conforme indicado na tabela 6, observa-se o alto potencial de economia, tanto financeira, quanto em emissões de gases poluentes devido à queima de combustíveis.

A economia observada para o período baseia-se na ideia de aproximação do valor teórico na medida em que reduz-se as grandes variações de potência pelos geradores da embarcação. Nesse contexto, estes valores devem, na sequência deste cálculo, passar por testes experimentais, de modo a entender a real economia.

Ainda que o aumento do intervalo da média móvel indique um gasto ligeiramente maior de combustíveis, o resultado esperado ao longo destes testes experimentais é que a aplicação de intervalos maiores, como por exemplo a média simples, sejam os que impactam mais na redução de consumo, uma vez que é o método que mais reduz os picos de potência fornecidos pelos geradores. Isso significa que o trabalho acredita haver

margens de incerteza maiores relativas às médias de 50, 100 e 200 segundos, do que em relação à média simples, por exemplo.

Dessa forma, apenas a aplicação do método proposto com a implementação de uma bateria para o mesmo regime de operação, em um período de aproximadamente três horas já seria capaz de reduzir o consumo de combustível em 50.9 litros, representando uma economia de 5.5%, o que estaria em linha com o resultado encontrado por Barelli (2018), dado que a bateria possui maior participação que no estudo de comparação, que obteve cerca de 2% de redução.

Em seguida, em relação ao número de motores em atividade, também foi identificada uma possibilidade de redução de consumo, que é um dos temas de foco do projeto precedente a este. Dessa forma, é identificada uma possível economia total de 301.0 litros para o período de observação, a partir da utilização de apenas um gerador, responsável por fornecer toda a potência, representando uma redução de 32.3% de combustível. Esta hipótese, portanto, possui um risco maior envolvido na operação, dado que fornece menor segurança ao funcionamento da embarcação, além de aumentar o risco de sobrecarga deste motor em funcionamento.

Nesse contexto, em virtude do que foi obtido ao longo deste trabalho, entende-se necessário o complemento deste projeto com a experimentação prática desta técnica, de modo a representar a efetividade do método. Em conjunto, o aprofundamento nas informações da embarcação de referência e entendimento das emissões produzidas podem fornecer embasamento suficiente para quantificação das economias de emissões de GEE, e não apenas de combustíveis.

5.2. Estudo da bateria a ser utilizada

A partir das análises realizadas em relação à bateria a ser acoplada para realização do processo descrito ao longo deste trabalho,

entendemos pela observação da Tabela 9 e pelo entendimento da potência máxima demandada pela embarcação no período que apenas as baterias acima de 300 kWh de capacidade total de estocagem de energia podem ser aplicadas. Dessa forma, em resumo temos que:

Capacidade (kWh)	C-Rate Max.	C-Rate Max apenas bateria
300	3.1	5.7
400	2.3	4.2
500	1.9	3.4
600	1.5	2.8

Tabela 11: Resumo das informações relativas às baterias analisadas

Dessa forma, a escolha da bateria deve levar em consideração o desejo de introdução do fator de segurança no qual a bateria se torna capaz ou não de alimentar a embarcação sozinha. Neste caso, por exemplo, a bateria de 300 kWh não representa uma boa opção, por conta de uma necessidade de *C-Rate* elevado, o que aumenta significativamente o custo do equipamento. Para isto, no caso da necessidade de utilização da bateria como única fonte de energia durante um certo período, cabe avaliar a escolha de baterias de maior porte, como 500 ou 600 kWh, enquanto para a operação apenas do *peak-shaving*, baterias de menor porte podem ser escolhidas de modo a baratear o custo total.

Além disso, conforme observado anteriormente, a escolha de maiores *C-Rates* implica em maiores variações de carga, dada a maior facilidade de fornecimento e absorção de potência. Nesse contexto, deve-se também buscar equilibrar a vida da bateria, que é fortemente impactada pelo número de ciclos de carga que recebe, além da quantidade de carga necessária em cada um desses ciclos.

Como próximos passos no estudo das baterias, cabe a realização de análises combinando comparações entre custo e vida de baterias de diferentes capacidades e *C-Rates*, entendendo o melhor equilíbrio, que não seja de alto custo, mas que também não demande troca constante, a

partir de metodologias similares ao trabalho efetuado por Martins (2018), por exemplo.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] ANDRADE, Bernardo; BIAZON, Tássia. O transporte marítimo e o uso sustentável do oceano. **Jornal da USP**, 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/artigos/o-transporte-maritimo-e-o-uso-sustentavel-do-oceano/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

[2] MCKINSEY & COMPANY. Global Energy Perspective 2022: Executive Summary. **McKinsey & Company**, 2022. Disponível em: <https://bitly.com/qtClmhOFR>. Acesso em: 12 nov. 2022.

[3] GUDMUNDSSON, Snorri. **General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures**. Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5.

[4] MARSH, Matthew. Starwind 860: Range and efficiency. **M.B. Marsh Marine Design**, 2012. Disponível em: <https://marine.marsh-design.com/content/starwind-860-range-and-efficiency>. Acesso em: 12 nov. 2022.

[5] ELECTRICAL VEHICLE TEAM, Mit. A Guide to Understanding Battery Specifications. **MIT**, 2008. Disponível em: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf. Acesso em: 12 nov. 2022.

[6] QUANTUMSCAPE, Corporation. Distinguishing charge rates for next-generation batteries. **QuantumScape**, 2021. Disponível em: <https://www.quantumscape.com/resources/blog/distinguishing-charge-rates-for-next-generation-batteries/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

[7] BUENO, Matheus. Peak-shaving: reduzindo picos de demanda com sistemas de armazenamento: O uso de sistemas com baterias permite reduzir os custos com tais picos. **Canal Solar**, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/peak-shaving-reduzindo-picos-de-demanda-com-sistemas-de-armazenamento/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

[8] BERTEL STEEN, Corporation. Energy systems for the future: Norway's largest battery energy storage systems. **Bertel Steen**, 2021. Disponível em:

<https://www.bospower.com/news/energy-systems-for-the-future-norways-largest-battery-energy-storage-systems/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

[9] TOLEDO, Thiago; CARNEIRO, Priscila. **Dados - matriz energética**. Out. 2020. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>. Acesso em: 14 dez. 2022.

[10] WANG, Shiyong; GE, Mengpin. **Transporte é a fonte de emissões que mais cresce. Veja o que dizem os números**. 21 out. 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/transporte-e-fonte-de-emissoes-que-mais-cresce-veja-o-que-dizem-os-numeros>. Acesso em: 14 dez. 2022.

[11] PETROBRAS. **Combustíveis Marítimos**. Jan. 2021. Disponível em: https://petrobras.com.br/data/files/02/83/FA/2C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual_Combustiveis_Maritimos_2021.pdf. Acesso em: 14 dez. 2022.

[12] Barelli, L.; Bidini, G.; Gallorini, F.; Iantorno, F.; Pane, N.; Ottaviano, P.A.; Trombetti, L. **Dynamic Modeling of a Hybrid Propulsion System for Tourist Boat**. *Energies* 2018, 11, 2592. <https://doi.org/10.3390/en11102592>. Acesso em: 14 dez. 2022.

[13] Ovrum, E.; Bergh, T.F. **Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation**. *Appl. Energy* 2015. Acesso em: 14 dez. 2022.

[14] Martins, R.; Hesse, H.C.; Jungbauer, J.; Vorbuchner, T.; Musilek, P. **Optimal Component Sizing for Peak Shaving in Battery Energy Storage System for Industrial Applications**. *Energies* 2018, 11, 2048. <https://doi.org/10.3390/en11082048>

- [15] YANG, Shu-Xia *et al.* **An optimization model for charging and discharging battery-exchange buses: Consider carbon emission quota and peak-shaving auxiliary service market.** 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067072100072>
X. Acesso em: 12 dez. 2022.
- [16] EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design.** [S.l.]: CRC press, 2009.
- [17] Kim, Kyunghwa, Juwan An, Kido Park, Gill-tae Roh and Kangwoo Chun. **"Analysis of a Supercapacitor/Battery Hybrid Power System for a Bulk Carrier."** *Applied Sciences* (2019).
- [18] Z. Wang and S. Wang, **"Grid Power Peak Shaving and Valley Filling Using Vehicle-to-Grid Systems,"** in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1822-1829, July 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2264497.