

# **Aplicação dos métodos AHP e SAPEVO-M na análise da viabilidade técnica e econômica de se implantar a propulsão elétrica em embarcações de transporte de passageiros da Marinha do Brasil**

**Sérgio Mitihiro do Nascimento Maêda**  
sergiomnmaeda@gmail.com  
UFF

**Igor Pinheiro de Araújo Costa**  
costa\_igor@id.uff.br  
UFF

**Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros Teixeira**  
frederico.horacio@gmail.com  
CASNAV

**Carlos Francisco Simões Gomes**  
cfsg1@bol.com.br  
UFF

**Marcos dos Santos**  
marcosdossantos\_doutorado\_uff@yahoo.com.br  
IME

**Resumo:** O acesso de alunos, servidores civis e militares do cais do 1º Distrito Naval para a Ilha das Enxadas (localizada na Baía de Guanabara no Rio de Janeiro) ocorre por meio de embarcações que executam uma rotina diária de viagens, gerando um elevado consumo de óleo diesel e lubrificante. O propósito deste trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômica de se implantar a propulsão elétrica por baterias de íons de lítio em novas embarcações, no intuito de substituir as atuais que utilizam o sistema diesel convencional. Para tanto, foram coletados dados técnicos e operacionais das referidas embarcações, solicitadas propostas comerciais a empresas do setor, e mediante entrevistas com os militares responsáveis pelas embarcações, foram definidos para a análise dos sistemas propulsivos em questão os critérios de: Custo de Implantação, Custo de Operação, Aspecto Socioambiental e Massa Bruta Total, sendo avaliados à luz dos métodos de apoio multicritério à decisão: AHP e SAPEVO-M. O estudo verificou a viabilidade do projeto e poderá servir de base no intuito de promover esta tecnologia em outras embarcações pelos diversos distritos da Marinha do Brasil.

**Palavras Chave:** Multicritério - AHP - SAPEVO-M - Marinha do Brasil - Eficiência

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento econômico dos países, em especial dos emergentes, têm sido acompanhado pelo maior consumo de combustíveis fósseis, elevando consideravelmente as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa, intensificando assim os problemas relativos às mudanças climáticas e à poluição ambiental (FISCHETTI, 2019). Dessa forma, devido à crescente preocupação com os impactos ocasionados, esses países vêm investindo no desenvolvimento de tecnologias limpas, renováveis e estudando metodologias para incorporar a variável socioambiental na tomada de suas decisões econômicas (GINAID et al. 2017).

Neste contexto de desenvolvimento econômico aliado com a preservação do meio ambiente, a adoção da propulsão elétrica em embarcações, seja ela conjugada com o diesel convencional, ou implementada de maneira única, vem ganhando grande importância, estabelecendo-se como uma das mais atrativas opções no meio naval (FREIRE, 2004). Proprietários de estaleiros e embarcações estão investindo cada vez mais em sistemas navais híbridos e elétricos a fim de aumentar a flexibilidade na concepção de novas embarcações (MELLO et al. 2011).

O investimento no desenvolvimento de novas tecnologias na área de sistemas de propulsão elétrica para embarcações vem se intensificando nas últimas décadas. Segundo SYMINGTON (2016), “novas químicas promissoras para baterias estão sendo desenvolvidas e as existentes sendo aprimoradas com a nanotecnologia”. Proprietários de estaleiros e embarcações estão investindo cada vez mais em sistemas navais híbridos e elétricos a fim de aumentar a flexibilidade na concepção de novas embarcações, bem como aprimorando o desempenho operacional e práticas gerenciais para elevar sua vantagem competitiva frente a concorrência do mercado externo (MELLO et al. 2011).

Entretanto, a decisão de adotar novas tecnologias em substituição a outras existentes, deve ser realizada de forma cautelosa, mediante estudos que analisem os seus impactos no meio onde será inserida. Considerando que tomar uma decisão é fazer uma escolha entre diversas alternativas, esta deve oferecer os melhores resultados para o decisor. As alternativas factíveis de atender ao objetivo da decisão e, portanto, selecionadas para avaliação, devem ser comparadas em função dos critérios e sob a influência de atributos considerados mais importantes para o avaliador (Gomes e Gomes, 2019).

Segundo Gomes e Gomes (2019), os métodos de apoio multicritério à decisão (AMD) são técnicas de assessoramento ao agente decisor para a tomada de decisões sobre problemas complexos, selecionando, avaliando ou ordenando alternativas mediante diferentes pontos de vista e dentro de critérios pré-estabelecidos. Ainda, de acordo com Santos et al (2016), a Pesquisa Operacional (PO) é uma ciência composta por inúmeras técnicas e modelos intrinsecamente relacionados com a otimização de sistemas produtivos, sendo uma ferramenta de otimização utilizada no apoio à decisões em cenários complexos, evitando que elas aconteçam de forma pouco criteriosa, dotando-as de maior racionalidade e objetividade.

Com base no exposto, mediante a utilização das ferramentas de auxílio multicritério no processo de decisão: AHP (Analytic Hierarchy Process), e SAPEVO-M (Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors - Multi Decision Makers, este artigo tem por objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica de se aplicar a tecnologia da propulsão elétrica utilizando baterias de íons de lítio (Li-Ion) para o acúmulo energético nas embarcações que realizam o transporte de passageiros do cais do 1º Distrito Naval para a Ilha das Enxadas (localizada na Baía de Guanabara no Rio de Janeiro). Essas embarcações realizam diariamente o traslado de alunos, servidores civis e militares para o Centro de Instrução Almirante

Wandenkolk (CIAW), onde em rotinas normais são cerca de quarenta travessias diárias e nas de domingo (fins de semana e feriados), em torno de quatorze, gerando um consumo médio mensal de quatro mil e quinhentos litros de óleo diesel marítimo (ODM).

A modelagem proposta no artigo poderá servir de base para o desenvolvimento de novas pesquisas na área, no intuito de promover esta tecnologia em outras embarcações pelos diversos distritos da Marinha do Brasil (MB). Ao longo prazo, a adoção deste tipo de propulsão poderá diminuir os custos operacionais e de sua implementação, gerando ganhos aos cofres públicos com a redução de manutenções, gastos com óleo combustível e lubrificantes.

## 2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foram analisados os dados técnicos e de operação de duas das cinco embarcações que atualmente encontram-se em operação na função: CIAW 08 SIRIUS II e CIAW 07 CONOPUS II. Os referidos dados foram obtidos a partir de manuais técnicos, pesquisa de campo e entrevista com os militares responsáveis por sua operação e manutenção.

Para a especificação do motor elétrico foram consideradas as características técnicas dos motores diesel atualmente em operação. Para quantificar a energia a ser armazenada no banco de baterias, foram observados os regimes de operação das embarcações, especificações técnicas dos motores e características físico-químicas do óleo diesel marítimo empregado, e mediante o conhecimento da densidade média e do volume de óleo diesel consumido, obteve-se a massa de combustível utilizada em cada viagem. De posse do seu poder calorífico e eficiência dos motores, estimou-se a energia total gasta pelas embarcações, assim, com os dados de eficiência e potência dos motores elétricos, obteve-se o quantitativo de energia a ser armazenada.

Para mensurar o custo base do sistema de propulsão elétrica, foram solicitados orçamentos a empresas do setor, levando em consideração as características de construção das embarcações atuais. Com os dados obtidos, realizou-se uma análise com as ferramentas de AMD: AHP e SAPEVO-M; a fim de verificar qual sistema de propulsão oferece os maiores benefícios. Considerando-se os critérios de: custo de aquisição, custo operacional, aspecto socioambiental e massa bruta total, os quais foram avaliados por oficiais militares responsáveis pelo sistema de transporte do CIAW.

## 3. APRESENTAÇÃO DOS DADOS – ESTUDO DE CASO

### 3.1. DADOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DAS LANCHAS CIAW 07 E CIAW 08

As embarcações CIAW 07 Conopus II e 08 Sirius II, apresentadas na figura 1 realizam diariamente o itinerário 1º Distrito Naval x Ilha das Enxadas a uma velocidade que varia entre 6 a 7 nós (um nó equivale a 1852 metros por hora), com tempo médio de travessia de vinte minutos.



**Figura 1:** Lancha CIAW 07 CONOPUS II e CIAW 08 SIRIUS II.

**Fonte:** Própria (2020)

O sistema de propulsão é composto basicamente por duas linhas de eixo independentes, cada uma com um motor MWM 229 6 turbo diesel e uma unidade reversora twin-disc MG 5050V-drive. A tabela 1 apresenta os dados técnicos das embarcações.

**Tabela 1:** Dados técnicos das lanchas CIAW 07 e 08

Construção	1981	Calado	1m
Estrutura	Madeira e Fibra de vidro	Deslocamento	28,2 ton
Comprimento	18,6m	Tanques de combustível	4 x 200l
Boca moldada	4,4m	Motores (2x)	MWM 229 6 TD, 97kW @2500rpm
Pontal	1,8m	Reversoras (2x)	TWIN-DISC MG 5050 V-DRIVE
Calado	1m	Velocidades de serviço	2200 rpm – 9 nós
Lotação	135 passageiros		1800 rpm – 7 nós
			1600 rpm – 5 nós
Observação: rpm é abreviatura de rotações por minuto; 1 nó significa uma milha por hora, aproximadamente 1852 metros por hora.			

**Fonte:** Própria (2020)

De acordo com os dados fornecidos pelo militar responsável pelo controle do consumo e armazenamento dos combustíveis das embarcações no CIAW, em cada viagem, as lanchas 07 (CONOPUS II) e 08 (SIRIUS II) consomem em média 15 litros de óleo diesel.

A tabela 2 apresenta os dados de consumo das embarcações do CIAW durante o período de janeiro a maio de 2019.

**Tabela 2:** Consumo de ODM em litros

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior
03 (RIGEL)	400	*	800	*	867
06 (ORION II)	856	*	544	944	1042
07 (CONOPUS II)	608	1160	951	580	1111
08 (SIRIUS II)	1768	1916	1527	1983	1808
14 (CHUI)	230	811	1119	1338	*
Consumo mensal	3862	3887	4941	4845	4828
Consumo médio mensal	4473				

**Fonte:** Própria (2020)

### 3.2. ANÁLISE DA CAPACIDADE DE POTÊNCIA INSTALADA

As lanchas 07 e 08 possuem um sistema de propulsão diesel convencional composto basicamente por dois motores MWM 229 6 TD cada um com uma unidade reversora Twin Disc MG5050 V-Drive acoplada. Os motores, segundo dados do manual técnico da MWM, geram a potência instalada de 214 kW a 2500 rpm (MWM, 2019).

### 3.3. ESTIMATIVA DA MASSA BRUTA DO SISTEMA ATUAL

De acordo com a tabela 1, o volume total de armazenamento de óleo combustível é de 800 litros, distribuídos uniformemente em quatro tanques. Considerando a densidade de 876,8kg/m<sup>3</sup>@20°C, este volume resulta em uma massa de 701,44kg. (FARAH, 2012).

Cada motor MWM 229 6 TD, possui massa de 545kg, que juntamente com a unidade reversora que possui 70kg, gera um total de 615kg. Como cada embarcação possui duas unidades, o conjunto rende uma massa total de 1230kg. (MWM, 2019). Com isto, apenas considerando a massa de ODM com os propulsores, dispõe-se inicialmente de um valor de 1931,44kg.

## 4. ANÁLISE TÉCNICA DO SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA PROPOSTO

### 4.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O sistema é baseado na utilização da energia armazenada em um banco de baterias, dois conversores de corrente contínua - corrente alternada, dois motores síncronos trifásicos com reversoras acopladas, um sistema de monitoramento e gerenciamento do motor e do banco de baterias, um carregador de baterias para instalação em terra e pelos painéis para a interface com o operador.

### 4.2. ANÁLISE DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As baterias de Íons de lítio (Li-Ion) são utilizadas quando se deseja alta densidade de energia associada a uma redução substancial de massa.

A tabela 3 apresenta as características das principais tecnologias de baterias encontradas no mercado.

**Tabela 3:** Características das baterias

Tipo de Bateria	NiCd	NiMh	Li-Ion	Chumbo
Densidade de Energia (Wh/kg)	60	80	160	40
Número médio de Ciclos	1500	500	700	300
Tempo de Carga (h)	1	3	3	12
Autodescarga Mensal %	20	30	10	5
Tensão da célula (Volts)	1,25	1,25	3,6	2

Fonte: Própria (2020)

### 4.3. ESTIMATIVA DA MASSA BRUTA DO SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA

Para realizar a estimativa da massa ocupada pelo banco de baterias de Íons de Lítio, consideramos para a análise o princípio da conservação de energia da Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece que a energia de um sistema não pode ser criada ou destruída, mas sim convertida de uma forma para outra (VAN WYLEN at al. 2008).

Mediante aos dados da quantidade de ODM consumido em uma travessia, obteve-se com o seu poder calorífico, a energia total gasta pelo motor diesel. Com o seu rendimento médio, quantificamos a fração da energia efetivamente utilizada para gerar trabalho. A partir desses dados, considerando um motor elétrico de potência compatível, o seu rendimento médio e mediante a razão de proporcionalidade, verificamos a energia elétrica que seria utilizada no mesmo trajeto, com isso e a relação de densidade energética, estimou-se a massa total do banco de baterias de íons de lítio.

Volume médio de ODM gasto na viagem: 151;

Densidade média do ODM: 876,8kg/m<sup>3</sup>@20°C (FARAH, 2012);

Massa média de ODM gasta na viagem: 13,152 kg;

Poder calorífico do ODM: 12 kWh/kg (FARAH, 2012);

Energia utilizada: 157,8kWh;

Eficiência térmica do motor diesel 4 tempos: 44% (VAN WYLEN at al. 2008);

Eficiência do motor elétrico trifásico de ímãs permanentes: 95-98% (WEG, 2019);

Energia utilizada do banco de baterias por viagem:  $(157,8 \times 0,44) / 0,98 = 70,8 \text{ kWh}$ .

Considerando a densidade de energia de 160Wh/kg (STA, 2019), temos:  $70,8 / 0,16 = 442,8 \text{ kg}$  de bateria, isto para fornecer a energia necessária para cada viagem.

Considerando o cenário hipotético de dispormos de cinco embarcações semelhantes e em uma rotina normal de operação (vinte travessias), cada uma realizando quatro viagens diárias, e em caso de não se considerar o carregamento extra, cada embarcação deverá possuir 1771,2 kg em seus bancos de baterias, e sendo que a massa do motor elétrico é de 195 kg, para este sistema teríamos a massa estimada de 2161,2 kg.

#### 4.4. ANÁLISE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO EM ESTUDO

##### 4.4.1. ESTIMATIVA DO CUSTO BASE DO SISTEMA DE PROPULSÃO DIESEL

Foi solicitada a uma empresa representante da MWM no Rio de Janeiro, uma proposta comercial para o fornecimento de dois motores com suas unidades reversoras com base nos dados técnicos similares das embarcações CIAW 07 e 08.

Os valores da proposta comercial repassados foram de R\$ 90.300,00 para cada motor e de R\$ 43.950,00 para cada unidade reversora, assim sendo, como cada embarcação possui dois motores e duas reversoras, o valor total da proposta foi de R\$ 268.500,00.

##### 4.4.2. ESTIMATIVA DO CUSTO BASE DO SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA

Foi solicitado à empresa italiana Transfluid, uma proposta comercial para o fornecimento do sistema de propulsão elétrica para as referidas embarcações.

Os bancos de baterias foram orçados para proporcionar uma autonomia suficiente para quatro viagens. O valor da proposta foi de: \$293.500,00 o que convertendo para reais, considerando o câmbio na época de US\$ 1 para R\$ 3,87, tem-se o montante de R\$ 1.135.845,00.

##### 4.4.3. ANÁLISE BÁSICA DOS CUSTOS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO

- Sistema de propulsão diesel convencional: 15 litros x R\$ 4,00\* = R\$ 60,00

- Sistema de propulsão elétrica: O custo estimado de kWh por viagem é de: (69,3 kWh para quatro viagens x R\$ 1,00\*\*)/4 = R\$ 17,32

\*Considerando o valor de R\$ 4,00 para o ODM.

\*\*Considerando como valor médio entre os horários de ponta e fora de ponta.

## 5. ANÁLISE PELOS MÉTODOS MULTICRITÉRIO

### 5.1. O MÉTODO AHP

O método AHP foi desenvolvido por Thomas L. Saaty e fornece um procedimento compreensivo e racional para modelar um problema de decisão, representando e quantificando as variáveis envolvidas em uma hierarquia de critérios ponderados por preferências (pesos). O resultado é um modelo que permite analisar várias alternativas com base na capacidade humana de usar a informação e a experiência para estimar magnitudes relativas por meio de comparações par a par realizadas de forma consistente e racional. A conversão de dados empíricos em modelos matemáticos é o principal diferencial do método.

Os valores obtidos são processados e comparados. Para cada um dos fatores são atribuídos pesos que serão necessários para a avaliação dos elementos (AGÁPITO, 2016).

A tabela 5 apresenta a escala fundamental de Saaty, onde os números representam o grau de intensidade de um determinado atributo em relação a outro, e associados à cada número há uma escala verbal que visa facilitar o entendimento durante a atribuição dos pesos.

**Tabela 4:** Escala fundamental de Saaty

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Fraca importância	O julgamento favorece levemente uma atividade em relação a outra
5	Forte importância	O julgamento favorece fortemente uma atividade em relação a outra.
7	Muito forte importância	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra
9	Importância absoluta	Uma atividade é favorecida em relação a outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

### 5.1.1. CRITÉRIOS ADOTADOS NA AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS PROPULSIVOS

A tabela 5 apresenta os critérios utilizados na avaliação, obtidos mediante entrevista com o Oficial militar responsável pela divisão de transportes do CIAW. Por questão de sigilo, aqui é referido como “Oficial 1”.

**Tabela 5:** Critérios adotados na avaliação

Critério	Propulsão Diesel	Propulsão Elétrica
C <sub>1</sub> - Custo de Implantação	Baixo	Alto
C <sub>2</sub> - Custo de Operação	Médio	Baixo
C <sub>3</sub> - Aspecto Socioambiental	Ruim	Ótimo
C <sub>4</sub> - Massa Bruta	Média	Elevada

Fonte: Própria (2020)

### 5.1.2. AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS PROPULSIVOS

Com base na escala de Saaty, a tabela 6 apresenta a matriz de preferências, obtida por meio da avaliação do grau de cada atributo na linha em relação a outro na coluna. Essa avaliação de preferência deve ser normalizada, e em seguida é obtida a média de cada critério dentro das alternativas possíveis.

**Tabela 6:** Matriz de preferências

Critério Custo de Implantação						
Preferência			Normalização			Média
C <sub>1</sub>	Diesel	Elétrica	C <sub>1</sub>	Diesel	Elétrica	
Diesel	1	5	Diesel	1/(6/5)	5/6	0,8333
Elétrica	1/5	1	Elétrica	(1/5)/(6/5)	1/6	0,1666
Σ	6/5	6	Σ	1	1	
Critério Custo de Operação						
Preferência			Normalização			Média
C <sub>2</sub>	Diesel	Elétrica	C <sub>2</sub>	Diesel	Elétrica	
Diesel	1	1/5	Diesel	1/6	(1/5)/(6/5)	0,1666
Elétrica	5	1	Elétrica	5/6	1/(6/5)	0,8333
Σ	6	6/5	Σ	1	1	
Critério Aspecto Socioambiental						
Preferência			Normalização			Média
C <sub>3</sub>	Diesel	Elétrica	C <sub>3</sub>	Diesel	Elétrica	
Diesel	1	1/9	Diesel	1/10	(1/10)/(10/9)	0,1000
Elétrica	9	1	Elétrica	9/10	1/(10/9)	0,9000
Σ	10	10/9	Σ	1	1	
Critério Massa Bruta						
Preferência			Normalização			Média
C <sub>4</sub>	Diesel	Elétrica	C <sub>4</sub>	Diesel	Elétrica	
Diesel	1	3	Diesel	1/(4/3)	3/4	0,7500
Elétrica	1/3	1	Elétrica	(1/3)/(4/3)	1/4	0,2500
Σ	4/3	4	Σ	1	1	

Fonte: Própria (2020)

### 5.1.3. AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS CONSIDERADOS:

De maneira análoga ao realizado no item 5.1.2, os critérios considerados na análise são avaliados, conforme observado na tabela 7:

**Tabela 7:** Avaliação dos Critérios

Preferência entre os critérios					Normalização					Média
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	
C <sub>1</sub>	1	1/3	1/7	5	C <sub>1</sub>	1/(56/5)	(1/3)/(40/9)	(1/7)/100/63)	5/24	0,11565476
C <sub>2</sub>	2	1	1/3	9	C <sub>2</sub>	3/(56/5)	1/(40/9)	(1/3)/(100/63)	9/24	0,26946429
C <sub>3</sub>	7	3	1	9	C <sub>3</sub>	7/(56/5)	3/(40/9)	1/(100/63)	9/24	0,57625
C <sub>4</sub>	1/5	1/9	1/9	1	C <sub>4</sub>	(1/5)/(56/5)	(1/9)/(40/9)	(1/9)/(100/63)	1/24	0,03863095
Σ	56/5	40/9	100/63	24	Σ	1	1	1	1	

Fonte: Própria (2020)

### 5.1.4. MULTIPLICAÇÃO DA MATRIZ DE PREFERÊNCIAS COM A MÉDIA DOS CRITÉRIOS:

A tabela 8 apresenta a multiplicação entre a matriz de preferências com a média dos critérios conforme:  $[(C_1 * C_1 + C_2 * C_2 + C_3 * C_3 + C_4 * C_4) / (\text{número de critérios})]$

**Tabela 8:** Multiplicação da matriz de preferências com a média dos critérios

	Matriz de Preferências				Médias dos Critérios				Resultado
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	
Diesel	0,8333	0,1666	0,1000	0,7500	0,11565476	0,26946429	0,57625	0,03863095	0,204065
Elétrica	0,1666	0,8333	0,9000	0,2500					0,795935

Fonte: Própria (2020)

Conforme observado pela tabela acima, após a análise dos critérios entre as alternativas e considerando o peso atribuído a cada um, observa-se um resultado favorável à utilização da propulsão elétrica em relação à diesel, entretanto, necessita-se verificar a consistência dos julgamentos realizados.

### 5.1.5. AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO DE CONSISTÊNCIA (RC):

Uma das vantagens do método AHP é que ele permite identificar as inconsistências dos tomadores de decisão. Para  $n$  (número de elementos comparados) igual ou superior a quatro, a Razão de Consistência (RC) deverá ser menor que 0,09, para que a inconsistência dos juízos emitidos pelo decisor ser considerada aceitável. No caso avaliado, uma RC superior a 0,9 indicaria que o tomador de decisão deveria reavaliar ou julgamentos realizados (Gomes et al. 2011).

No método AHP clássico, o Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC) são avaliados conforme:

$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1)$ , onde: IC = Índice de Consistência;

$\lambda_{\text{máx}}$  = Autovetor da matriz

$n$  = número de critérios considerados.

$RC = (IC / IR)$ , onde o Índice Aleatório (IR) = 0,9, para  $n = 4$ .

A tabela 9 abaixo demonstram o cálculo da medida da consistência, da determinação do  $\lambda_{\text{máx}}$  e o cálculo do RC, respectivamente.

**Tabela 9:** Cálculo da coerência, da determinação do  $\lambda$  máximo e do RC

Cálculo da Consistência											
Totalização das entradas						Determinação do $\lambda_{\text{máx}}$					
	0,481	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>		Média ( $\Sigma$ )	Total	Totais		Média ( $\Sigma$ )	$\lambda_{\text{máx}}$
C <sub>1</sub>	1,156	0,33	0,14	5,00	X	0,1156	0,481	0,481	/	0,116	4,159
C <sub>2</sub>	2,542	1,00	0,33	9,00		0,2694	1,156	1,156		0,269	4,291
C <sub>3</sub>	0,156	3,00	1,00	9,00		0,5762	2,542	2,542		0,576	4,411
C <sub>4</sub>	0,20	0,11	0,11	1,00		0,0386	0,156	0,156		0,039	4,031
Cálculo do Índice de Consistência (IC) e da Relação de Consistência (RC)											
$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n-1)$										0,074	
$RC = IC/IA$										0,083	

Fonte: Própria (2020)

A avaliação da Relação de Consistência, resultou no valor 0,083, menor do que 0,09, assim sendo, o julgamento dos critérios na avaliação apresentou consistência suficiente, ou em outras palavras, uma inconsistência aceitável do decisor.

Verificou-se que a “preferência” pela adoção do sistema de propulsão elétrica nas embarcações analisadas é cerca de quatro vezes maior do que a diesel convencional, onde os critérios de apelo socioambiental e custo operacional contribuíram de forma mais expressiva no resultado.

## 5.2. O Método SAPEVO-M

De acordo com Teixeira (2019), o método SAPEVO-M (Simple Aggregation of Preferences Expressed by Ordinal Vectors – Multi Decision Makers) representa uma nova versão do método ordinal SAPEVO, criado por Gomes, Mury e Gomes (1997). Esta versão evoluída estende o método a múltiplos decisores, além de introduzir um processo de normalização das matrizes de avaliação, incrementando a consistência do modelo (TEIXEIRA et al., 2019). O método desdobra o problema decisório a partir de três etapas básicas, quais sejam:

- 1°. Transforma as preferências ordinais dos critérios em um vetor de pesos de critérios;
- 2°. Transforma as preferências ordinais de alternativas para um dado conjunto de critérios de classificação em pesos parciais de alternativas e;
- 3°. Determina os pesos globais das alternativas.

Em 2019 foi realizada a implementação computacional do método SAPEVO-M. O sistema SapevoWeb foi desenvolvido a partir de uma parceria entre o corpo técnico do Centro de Análise de Sistemas Navais (CASNAV), um grupo de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense (UFF) e um grupo de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Computação do Instituto Militar de Engenharia (IME) (TEIXEIRA et al. 2019). A ferramenta pode ser acessada em [www.sapevoweb.com](http://www.sapevoweb.com).

### 5.2.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO:

Diferente do método AHP, onde considerou apenas a avaliação do encarregado da divisão de transportes do CIAW, o “Oficial 1”, para a análise pelo método SAPEVO-M foram convidados outros dois militares da mesma divisão, a fim de compor uma abordagem mais ampla sobre o assunto. Estes militares são referenciados como “Oficial 2” e “Oficial 3”.

Com os decisores, critérios de comparação e alternativas de propulsão definidos, é possível inserir os dados no sistema computacional SapevoWeb, seguindo as etapas citadas por TEIXEIRA et al. (2019). Primeiramente, inserimos os Decision Makers (DM), como mostrado na figura 2.

### Cadastrar Decisor

Nome:

---

**Decisores**

Oficial 1

Oficial 2

Oficial 3

---

**Figura 2:** Cadastro dos decisores na plataforma SapevoWeb.  
**Fonte:** Própria (2020)

3. Em seguida, são cadastradas as alternativas dos sistemas propulsivos conforme a figura

### Cadastrar Alternativas

Nome:

---

**Alternativas**

Propulsão Elétrica

Propulsão Diesel

---

**Figura 3:** Cadastro das alternativas na ferramenta SapevoWeb.  
**Fonte:** Própria (2020)

Após esta etapa, são cadastrados os critérios a serem avaliados, conforme a figura 4.

### Cadastrar Critério

Nome:

---

**Critérios**

Custo de Implantação

Custo de Operação

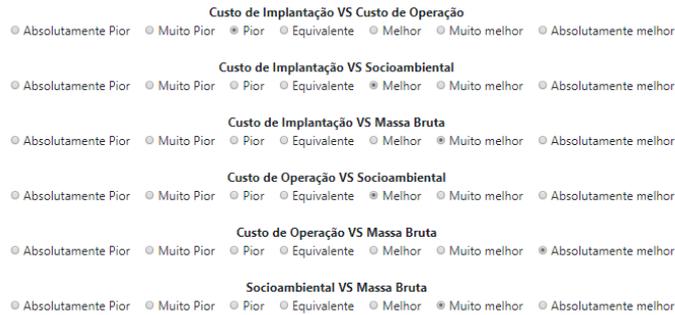
Socioambiental

Massa Bruta

---

**Figura 4:** Cadastro dos Critérios na ferramenta SapevoWeb.  
**Fonte:** Própria (2020)

Por fim, após cadastrar os decisores, critérios e alternativas, os DM avaliarão par a par a importância dos critérios e das alternativas, conforme a figura 5:



**Figura 5:** Exemplo de avaliação das alternativas por um DM na Plataforma SapevoWeb  
**Fonte:** Própria (2020)

Após a aplicação do método, obtemos o seguinte resultado para os pesos dos critérios e classificação das alternativas conforme a tabela 10 e 11, respectivamente.

**Tabela 10:** Resultado dos pesos de cada critério, fornecido pelo método SAPEVO-M

Critério	Peso
Custo de Implantação	2,18
Custo Operacional	3,0
Aspecto Socioambiental	2,49
Massa Bruta	0,020

**Fonte:** Própria (2020)

**Tabela 11:** Classificação dos sistemas propulsivos após aplicação do método SAPEVO-M

Ranking	Pontuação
Propulsão Elétrica	16,47
Propulsão Diesel	6,62

**Fonte:** Própria (2020)

Assim como no método AHP, os critérios de Custo Operacional e Aspecto Socioambiental tiveram uma maior influência para o resultado final, o qual manteve-se a preferência pela adoção da propulsão elétrica.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

O objetivo ao qual o trabalho se propôs foi atingido. A partir da análise dos dados de capacidade instalada, consumo energético e massa bruta dos sistemas, verificou-se a viabilidade técnica e econômica da adoção da propulsão elétrica em novas embarcações de transporte de passageiros em substituição ao diesel convencional. Embora o seu custo de implantação seja elevado, os gastos operacionais do sistema elétrico são cerca de quatro vezes menores, justificando a sua viabilidade econômica.

A aplicação do método AHP mostrou-se eficiente, resultando em um ranking das opções, hierarquizando-as de maneira clara e coerente segundo os critérios e pesos estabelecidos pelo próprio decisor, proporcionando assim um embasamento técnico e científico na formação da sua escolha. Verificou-se por meio deste método, que a “preferência” pela adoção do sistema de propulsão elétrica nas embarcações analisadas é cerca de quatro vezes maior do que a diesel convencional, onde os critérios de apelo socioambiental e custo operacional contribuíram de forma mais expressiva no resultado.

Diferente do AHP, o método SAPEVO-M considerou as avaliações de mais dois decisores, o DM “Oficial 1” e o DM “Oficial 2”, elevando a confiabilidade do resultado obtido, uma vez que aumentando o número de decisores envolvidos, o risco associado à escolha no processo decisório tende a diminuir.

Verificou-se por meio deste método, que a “preferência” pela adoção do sistema de propulsão elétrica nas embarcações analisadas é pelo menos duas vezes maior do que a diesel convencional, onde novamente os critérios de apelo socioambiental e custo operacional contribuíram de forma mais expressiva no resultado. Ressalta-se também a facilidade, flexibilidade, confiabilidade e rapidez de aplicação do método, o que pode facilitar os cálculos, muitas vezes complicados, que envolvem a AMD.

## 7. REFERÊNCIAS

**AGÁPITO, Andrezza de Oliveira et al.** Utilização do Método de Análise Hierárquica (AHP) como Ferramenta de Auxílio Multicritério no Processo de Decisão de Priorização de Projetos de Ciência, Tecnologia e Inovação na Amazônia Azul. *Blucher Marine Engineering Proceedings*, v. 2, n. 1, p. 474-483, 2016.

**FARAH, M. A.** *Petróleo e seus derivados*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

**FISCHETTI, Eugênio. et al.** Seleção da Localização Ideal para Investimentos em Energia Eólica por Meio da Análise Envoltória de Dados. In: *XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2019, São Paulo.

**FREIRE, Paulo; FERREIRA, César,** Propulsão Elétrica – Histórico e Perspectivas Futuras, 20º Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2004, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.

**GARCÍA, J. L. et al.** Multi-attribute Evaluation and Selection of Sites for Agricultural Product Warehouses Based on an Analytic Hierarchy Process. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 100, p. 60-69, 2014.

**GHISOLFI, Verônica; Ribeiro, Glaydston M.; Chaves, Gisele de L. D.** Uma Ferramenta para Planejamento da Descarbonização do Transporte de Cargas Brasileiro. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2019, Blumenau, SC.

**GINAID, Adhara; MARZANO, Luiz; DE SABÓIA, Carlos.** Incorporação de Critérios Socioambientais na Formulação do Problema de Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Geração de Energia Elétrica. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2017, Blumenau, SC.

**GOMES, L. F. A. M., e GOMES, C. F. S.** *Princípios e Métodos para a Tomada de Decisão: Enfoque multicritério* (6a ed.). São Paulo: Atlas. (2019).

**MELLO, Luiz; BANDEIRA, Renata; FILHO, José;** Análise da Competitividade dos Estaleiros Nacionais Fabricantes de Embarcações Offshore Através Estudo de Casos Múltiplos. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção*, v.11, n. 2, p. 369-398, abr./jun., 2011

**MWM. Motores.** Disponível em: <<http://www.mwm.com.br/site.aspx/Maritimo>>. Acesso em 15 Jun. 2019.

**SAATY, T. L.** *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 1980.

**SANTOS, Marcos dos et al.** Proposta de Otimização do Mix de Produção Utilizando o Método Simplex: Um Estudo de Caso de uma Confecção de Moda Íntima do Município de Cordeiro – RJ. In: *Anais do IV Simpósio de Engenharia de Produção: Lean Cost Management como filosofia global de otimização em organizações*. Recife (PE): FBV, 2016.

**SANTOS, Marcos dos et al.** Uma Abordagem Multicritério para Seleção de um Navio de Guerra de Médio Porte a ser Construído no Brasil. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2016, Vitória, ES.

**SYMINGTON, William P. et al.** Emerging technologies in marine electric propulsion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, v. 230, n. 1, p. 187-198, 2016.

**STA.** Baterias Tipos de Baterias Li-Ion. Disponível em: <<http://www.staeletronica.com.br/artigos/tipos-de-baterias-de-li-ion>>. Acesso em 08 Jun. 2019.

**TEIXEIRA, Luiz Frederico Horácio de Souza de Barros; SANTOS, Marcos dos; GOMES, Carlos Francisco Simões.** Proposta e Implementação em Python do Método Simple Aggregation of Preferences Expressed by



Ordinal Vectors - Multi Decision Makers: Uma Ferramenta web Simples e Intuitiva para Apoio à Decisão Multicritério. In: Simpósio de pesquisa operacional e logística da Marinha, 19, 2019, Rio de Janeiro, RJ. Anais [...]. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.

**VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.** Fundamentos da Termodinâmica Clássica. 4. ed. São Paulo: E.Blucher, 2008.

**WEG.** Eficiência Energética. Disponível em: <<http://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency>>. Acesso em 03 Mai. 2019.