

# MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE BATERIAS PARA O SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

## METHOD FOR SIZING AND SELECTING BATTERIES FOR THE ENERGY STORAGE SYSTEM OF AN ELECTRIC VEHICLE

Mário H. De O. Lira Junior<sup>1</sup>  
Flávio S. V. Gomes<sup>2</sup>  
Marcel A. Araújo<sup>3</sup>

### RESUMO

A concepção de um banco de baterias que satisfaça as exigências específicas e os requisitos de autonomia dos veículos elétricos é um projeto complexo e requer muita atenção. Para este dimensionamento, são utilizados requisitos que englobam as características das baterias, e que fornecem qual o tipo de célula de bateria mais indicada, bem como a melhor disposição para as mesmas. Neste contexto, este trabalho tenta desenvolver um método de dimensionamento e seleção de baterias para o sistema de armazenamento de energia de um veículo puramente elétrico, com base na análise da informação da demanda de energia do veículo e da especificidade das tecnologias das baterias. Os resultados demonstram que o método ajuda no processo de tomada de decisão, indicando o tipo mais apropriado de célula de bateria, bem como a forma de disposição e as principais características do sistema de armazenamento de energia da bateria.

**Palavras-chave:** dimensionamento; baterias; método de decisão; veículos elétricos.

### ABSTRACT

The design of a battery bank that satisfies the specific demands and range requirements of electric vehicles is a complex project and requires a lot of attention. For this sizing, requirements are used that encompass the characteristics of the batteries and provide which type of battery cell is most indicated, as well as the best arrangement for them. In this context, this work attempts to develop a battery sizing and selection method for the energy storage system of a pure electric vehicle based on the analysis of the vehicle energy demand information and the specificity of the battery technologies. The results demonstrate that the method assists in the decision making process, indicating the most appropriate type of battery cell, as well as the arrangement form and main characteristics of the battery energy storage system.

**Keywords:** sizing; batteries; decision method; electric vehicles.

---

<sup>1</sup> Bacharelado em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo.

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo

## INTRODUÇÃO

Diante da busca por processos menos agressivos ao meio ambiente, a adoção de ações mais sustentáveis e com menor impacto ambiental tem sido impulsionada por toda a sociedade, trazendo consigo o processo de substituição de soluções convencionais de mobilidade por Veículos Elétricos a Bateria (BEVs), que têm ganhado cada vez mais investimentos e políticas globais em seu favor<sup>1-5</sup>. É notável que a alimentação do sistema de tração dos Veículos Elétricos (VE) em geral, e especialmente dos BEVs, requer um sistema de armazenamento de energia. Neste caso, sistemas de armazenamento de energia baseados em bateria (BESSs) foram empregados e projetados para atender às demandas específicas de cada tipo de veículo.

A seleção do tipo de baterias e o dimensionamento do BESS são alguns dos fatores mais críticos tanto para o projeto de um EV quanto para impulsionar sua adoção massiva, já que atualmente as tecnologias de baterias para este tipo de aplicação estão em um estágio relativamente inicial de desenvolvimento e têm custos de fabricação e vendas muito altos<sup>6-11</sup>. Estes fatos contribuíram para que a maioria dos estudos na literatura sobre o desenvolvimento e análise da adoção dos VE's tratasse de pesquisas focadas na seleção e dimensionamento do BESS considerando as tecnologias de bateria a partir de suas características relacionadas à: tensão de operação, capacidade energética, densidade energética, densidade de potência, eficiência energética, dimensões da célula (altura, comprimento, largura e volume), peso, temperatura de operação, resistência interna, número de ciclos de vida, segurança, impacto ambiental para produção, reciclagem e descarte, entre outros<sup>6-11</sup>.

Além disso, o projeto do BESS para EV que atende às exigências específicas de cada tipo de veículo e suas necessidades de autonomia, torna este processo de seleção de baterias e dimensionamento do BESS bastante

complexo e caro, exigindo a adoção de requisitos e parâmetros que englobem as características das baterias, e que forneçam de forma otimizada qual tipo de célula de bateria é mais apropriado e como sua disposição deve ser (conexões em série e paralelas)<sup>12-15</sup>.

Nesse contexto, o presente trabalho explora o estudo e desenvolvimento de um método de dimensionamento e seleção de baterias para o sistema de armazenamento de energia de um EV a partir da análise de informações sobre a demanda de energia do veículo e a especificidade de diferentes tecnologias de baterias.

O artigo está organizado da seguinte forma a segunda seção apresenta os principais aspectos da metodologia que suporta o método em desenvolvimento, e a terceira seção apresenta os principais resultados da aplicação do método de dimensionamento do BESS, e como um estudo de caso foi utilizado um veículo SAE Fórmula elétrica<sup>21</sup>. Finalmente, a quarta seção apresenta as conclusões da pesquisa.

### **Métodos de dimensionamento de BESS**

Atualmente, entre os diferentes estudos e métodos para o dimensionamento de baterias, grande parte deles se baseia em dois pilares: o primeiro se baseia na definição da energia necessária para o veículo funcionar com base na modelagem dinâmica e sua aplicação específica, a fim de determinar o BESS a ser utilizado<sup>10,13,17</sup>. Métodos cuja função principal é determinar com precisão a demanda de energia consumida são geralmente usados quando uma célula específica já está definida e o BESS precisa ser dimensionado, ou quando a tecnologia ou características da célula não são levadas em conta para o dimensionamento. Por outro lado, para a construção do BESS pode ser crítico determinar qual célula é a melhor a ser usada e quais suas características devem ser consideradas, já que o projeto de um BESS tem que considerar várias características tanto do veículo quanto das células individuais,

o que implica em se resolver um problema baseado em múltiplos critérios.

O segundo pilar que orienta o dimensionamento do BESS é a comparação de diferentes tecnologias de células a partir de suas características técnicas e especificações, procurando escolher a melhor opção de bateria, a seguir serão citados alguns dos métodos que podem ser utilizados. O método Ashby foi desenvolvido para a seleção de materiais em diferentes aplicações, visando atender o desempenho do produto e minimizar os custos. De acordo com a abordagem proposta, a função desejada é minimizada/maximizada para otimizar o desempenho sob a influência das restrições impostas pelo método<sup>17</sup>. O "Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution" (TOPSIS) é baseada na idéia de que a melhor alternativa deve ter a menor distância para uma solução ideal, e supõe-se que se cada atributo tivesse uma variação monótona crescente ou decrescente, seria menos complexo definir uma solução ideal<sup>18,19</sup>. O "The Analytic Hierarchy Process" (AHP), por outro lado, é baseado na análise hierárquica de atributos e comparações em pares dos aspectos em análise para a tomada de decisão<sup>19</sup>. Outra abordagem para casos em que há múltiplos critérios a serem otimizados é o uso de métodos computacionais que permitem a otimização das funções de custo. Por exemplo, os algoritmos de otimização restritos e os algoritmos evolutivos aplicados à escolha da melhor célula para BESS<sup>12,15</sup>. Estas técnicas são os principais objetos dos estudos atuais quando se trata de análise comparativa entre células que melhor solucionam o problema e topologia, porém tendem a exigir técnicas avançadas de otimização e processamento computacional na solução do problema.

O método proposto por este trabalho é inicialmente baseado no dimensionamento da capacidade do BESS através de uma modelagem longitudinal do veículo proposto em<sup>10</sup>. Por conseguinte, o método AHP é aplicado para comparar diferentes opções de bateria disponíveis e escolher a célula que melhor se adapte à aplicação.

## METODOLOGIA

### Cálculo da Demanda de Energia

Para determinar a célula de bateria para um veículo, e conseqüentemente para projetar o BESS, a quantidade de energia consumida para que o veículo percorra uma determinada distância deve ser determinada. Assim, o consumo de energia do sistema de tração pode ser calculado por:

$$E_c = P_c \Delta t = \frac{P_c T_{total}}{3600}, \quad (1)$$

em que:

$$P_c = (m\dot{v} + C_d \rho v^2 \left(\frac{A}{2}\right) + f_r m g \cos \theta + m g \sin \theta) v. \quad (2)$$

Em que  $P_c$  é a potência mecânica,  $T_{total}$  é o tempo total considerando um dado perfil de velocidade,  $m$  é a massa total do veículo em kg,  $\dot{v}$  é a aceleração do veículo,  $C_d$  é o coeficiente de arrasto,  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área frontal do veículo,  $f_r$  é a resistência ao rolamento e  $\theta$  é a inclinação da estrada.

Para determinar a disposição das células da bateria, assim como sua massa, volume e densidade de energia, além de considerar a energia consumida  $E_c$  em kWh, deve-se tomar a tensão de entrada  $V_{inv}$  do inversor do sistema de tração elétrica e os parâmetros de tensão  $V_{cell}$  e capacidade de corrente  $I_{ah}$  da célula, e a massa da célula  $m_c$ . A disposição deve ser determinada utilizando as equações (3), (4), (5), (6) e (7):

$$N_s = \frac{V_{inv}}{V_{cell}} \quad (3)$$

$$N_p = \frac{E_c}{N_s V_{cell} I_{ah}} \quad (4)$$

$$m_p = N_t m_c \quad (5)$$

$$V_{ol.p} = N_t V_{ol.cell} \quad (6)$$

em que  $N_s$  é o número de células em série,  $N_p$  é o número de células em paralelo,  $N_t$  é o número total de células,  $m_p$  é a massa total do BESS,  $V_{ol.cell}$  é o volume da célula e  $V_{ol.p}$  é o volume do BESS.

Com base em (1) a (6), o método proposto foi desenvolvido e sistematizado na forma de um algoritmo, no qual a etapa de cálculo da demanda de energia é chamada de "Cálculo de Energia (kWh)". Para realizar este cálculo, é necessário fornecer ao algoritmo três tipos de informações: 1) as características mecânicas e dinâmicas do veículo (coeficiente de arraste, resistência ao rolamento e área frontal do veículo); 2) a característica do ambiente onde o veículo é conduzido (densidade do ar); 3) o ciclo e o perfil de variação da velocidade do veículo ao longo de uma determinada rota.

Além disso, de acordo com as equações (3) a (6), observa-se que as características específicas das células da bateria são relevantes para o dimensionamento do BESS. Portanto, para analisar comparativamente qual célula é a mais apropriada é necessário usar um método para atribuir peso a estas características de acordo com seu grau de importância para atender às necessidades de um veículo em particular, e, para este fim, o método AHP foi usado nesta pesquisa.

#### Metodo *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

O método AHP<sup>22</sup> baseia-se em uma análise hierárquica dos atributos objetivos e/ou subjetivos de um problema através de uma sequência de comparações em pares de aspectos qualitativos e quantitativos para a tomada de decisões. Para esta atribuição comparativa de graus de importância, Saaty recomenda o uso de uma escala de 1 a 9, conforme apresentado na Quadro 1.

O método é estruturado pela construção de uma árvore hierárquica com atribuição comparativa de graus de importância a cada um de seus critérios e subcritérios, de acordo com a prioridade relativa entre eles. Em seguida, uma matriz de comparação é montada entre os critérios e matrizes de comparação entre os subcritérios de cada um dos critérios seguindo seu nível hierárquico.

Quadro 1 – Índices do método AHP

Grau de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambos critérios contribuem igualmente para atingir o objetivo
3	Importância moderada	A comparação favorece ligeiramente um critério em relação ao outro
5	Forte importância	comparação favorece fortemente um critério em relação ao outro
6	Importância muito forte	A comparação favorece muito fortemente um critério em relação ao outro
9	Importância absoluta	A comparação favorece de forma absoluta um critério em relação ao outro
2,4,6 e 8	Valores intermediários entre os níveis de comparação	Quando se procura uma condição intermediária entre dois níveis consecutivos
Recíproco	(1/n) em que "n" é o peso atribuído a determinado critério	Suposição lógica

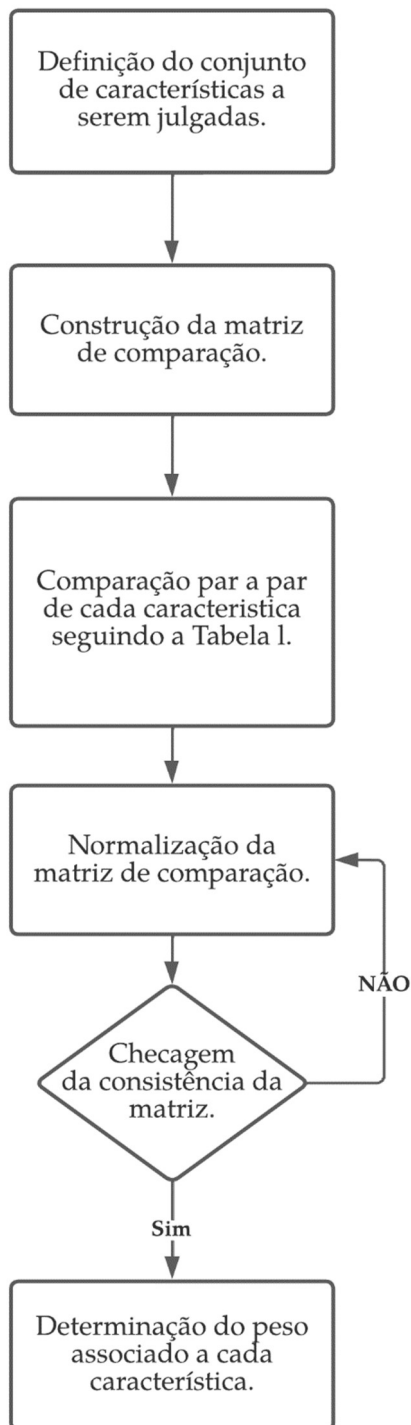
Fonte: Saaty, 1990

Estas matrizes de comparação resultam em pesos para os critérios e subcritérios, que compõem uma matriz de comparação de pesos, cujos resultados orientam o processo de tomada de decisão. O fluxograma deste método pode ser visto na Figura 1. Após determinar os pesos associados a cada característica, a consistência da matriz de comparação deve ser calculada como em (7), em que  $\lambda_{max}$  é o autovalor máximo da matriz e  $RI$  é o índice aleatório, que depende do tamanho da matriz. Se a matriz for consistente, os valores dos coeficientes devem ser a entrada para o algoritmo de seleção do tipo de célula da bateria.

Na seção “Algoritmo de seleção do tipo de célula de bateria”, discute-se o principal algoritmo do método proposto, no qual a entrada destes parâmetros é chamada de "parâmetros do método AHP".

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)RI} \quad (7)$$

Figura 2 – Fluxograma do Método AHP.



É importante destacar que antes de serem ponderados por seus respectivos pesos, os valores atribuídos a cada uma das características passaram por um processo de normalização, já que a diferença em ordem de grandeza deve ser considerada, por exemplo, a relação entre o preço total o BESS (cerca de 10.000 USD) e sua tensão total (74 V), que é cerca de 135 vezes. Portanto uma etapa de normalização foi realizada com os parâmetros de todas as características usando (8), fazendo com que o valor atribuído fique entre 0 e 1,

$$C_N = \frac{max_{par} - value_{par}}{max_{par} - min_{par}} \quad (8)$$

em que  $C_N$  é o resultado do valor após a normalização,  $max_{par}$  e  $min_{par}$  são respectivamente o valor máximo e mínimo que a característica dada pode atingir e  $value_{par}$  é o valor que é normalizado.

### Conjunto de células disponíveis

Para aplicar o método AHP, diferentes tipos de células e suas respectivas características devem ser fornecidos como entradas para que o algoritmo de seleção possa determinar qual é a mais apropriada. Estas entradas são fornecidas através de uma planilha, como mostra a Tabela 1, na qual é mostrado o número total (k) de tipos de células de bateria a serem comparadas pelo algoritmo. Os parâmetros necessários para a análise do algoritmo são: tensão (V), capacidade (Ah), profundidade de descarga (%), peso (kg), preço (USD) e volume (l). Além disso, foi adicionado o nome do fabricante, modelo e composição química, para identificar as células mais apropriadas para a aplicação em estudo.

Tabela 1 – Parâmetros das células utilizadas.

Índice	Modelo	Tensão (V)	Capacidade (mAh)	Profundidade de descarga	Massa (kg)	Preço	Volume (l)	Composição química
1	Modelo 1	3,7	32200	80%	0,557	Preço 1	0,234	LCO
2	Modelo 2	3,8	3200	80%	0,557	Preço 2	0,242	LCO+NCM
...	...	...	...	...	...	...	...	...
k	Modelo 1158	3,7	75	80%	0,002	Preço k	0,001	LCO

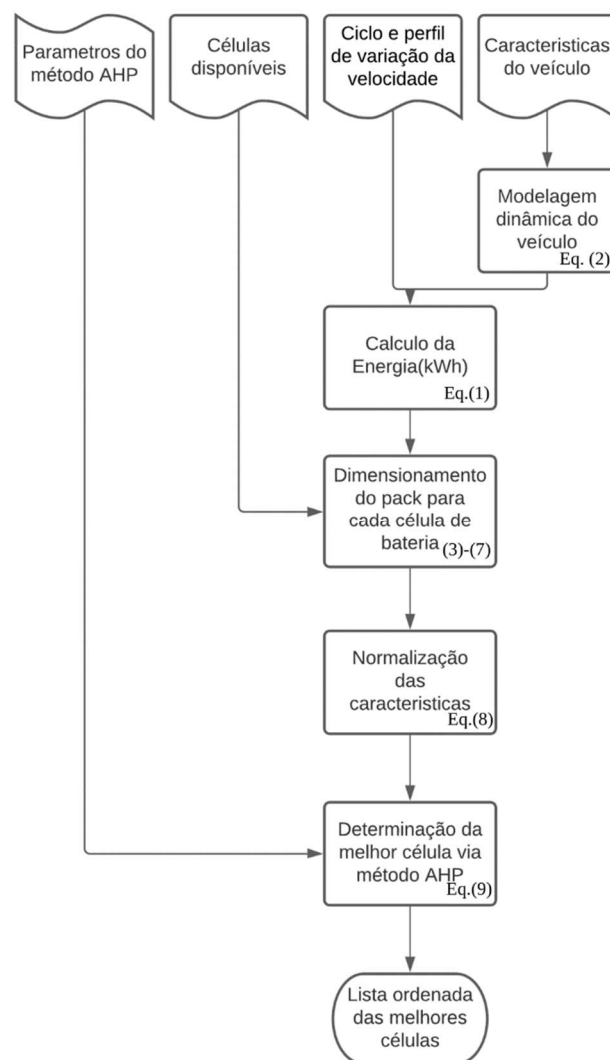
Fonte: Autor, 2022.

### Algoritmo de seleção do tipo de célula de bateria

Para determinar a melhor célula para constituir o BESS, foi desenvolvido um algoritmo, como mostrado na Figura 2, no qual se observa que tendo como entradas as características mecânicas e dinâmicas do veículo, é possível calcular a energia elétrica consumida. Assim, obtendo a energia necessária para realizar o ciclo de percurso desejado, o método proposto de dimensionamento do BESS pode ser realizado para cada célula disponível. Após o dimensionamento do sistema a normalização é realizada como em (8), e finalmente o método AHP é utilizado para determinar as melhores opções de bateria. Para calcular a pontuação de cada célula obtida, é aplicada a equação (9), na qual  $N$  é o número total de características,  $C_N$  é o valor da característica obtido como resultado de (8),  $P_N$  o peso associado a esta característica obtida através do método AHP. Portanto, a pontuação obtida é o resultado da aplicação do método, conforme apresentado na Figura 2.

$$Resultado = \sum_1^N \frac{P_N C_N}{N} \quad (9)$$

Figura 2 – Fluxograma do algoritmo.



Fonte: Autor, 2022.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na metodologia anteriormente mencionada, o método de dimensionamento do BESS foi implementado em linguagem Python, que

foi aplicado a um cenário base de um EV do tipo Fórmula SAE que necessita percorrer um circuito oval de uma prova de enduro de 22 km em cerca de 35 minutos. Este veículo utiliza um inversor de potência CVW-300<sup>21</sup>, cujos parâmetros de interesse para a presente análise, juntamente com outras informações sobre o veículo, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do veículo e do inversor de potencia.

Parâmetro	Valor
$C_d$	0.7
$\rho$	$1.2 \text{ kg/m}^3$
$A$	$1.128 \text{ m}^2$
$f_r$	0.013
$m$	$275 \text{ kg}$
$V_{inv}$	$76 \text{ V}$

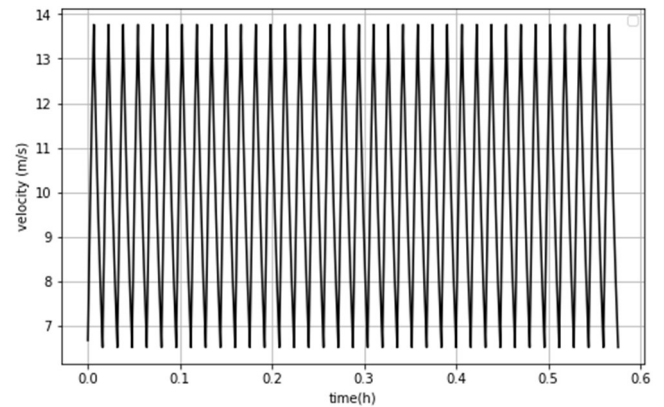
Fonte: Autor, 2022.

Além disso, para testar o método proposto, foram utilizadas 1158 tipos de células de bateria de um determinado fabricante, aqui chamado "Fabricante A", cujos parâmetros e características de interesse são mostrados na Tabela 1.

Com base nos parâmetros do veículo e da célula de bateria, a energia consumida pelo veículo foi calculada para percorrer toda a prova de endurance, considerando que a pista tinha regiões de frenagem e aceleração de acordo com o ciclo de condução e o perfil de velocidade mostrado na Figura 3. Como se pode ver, o veículo começa em repouso e percorre o mesmo circuito 22 vezes até completar toda a corrida em cerca de 35 minutos com uma velocidade média de cerca de 10 m/s e atingindo picos de cerca de 13,7 m/s. Assim, utilizando (1), calcula-se a energia consumida.

Tendo a informação de consumo de energia e os parâmetros associados a cada uma das células da bateria, o BESS pode ser dimensionado para cada tipo de células da bateria pesquisada. Para tal, foram utilizadas as equações (3), (4), (5) e (6), cujas topologias resultantes da aplicação do método desenvolvido podem

Figura 3 – Perfil de velocidade.



Fonte: Autor, 2022.

ser vistas na Tabela 3 em termos da quantidade de células em série, paralelas e totais. Após encontrar a topologia e as características de BESS para cada tipo de célula, a normalização dos parâmetros foi realizada como em (8), cujos resultados são mostrados na Tabela 4.

Finalmente, para determinar a melhor célula para construir o BESS é necessário ponderar cada característica pelo seu respectivo peso obtido através da aplicação do método AHP. Para tal, como descrito na segunda seção, aplicando o método AHP, foram montadas as matrizes de comparação de peso, cujos resultados orientam a tomada de decisão. Como uma das premissas do algoritmo é que para diferentes tipos de veículos existem pesos diferentes, no objeto de estudo esses pesos foram definidos com base em um levantamento interno realizado com os líderes técnicos do projeto Fórmula SAE EV na universidade onde esta pesquisa foi realizada. No levantamento foram consultados cinco setores: aerodinâmica, estruturas, transmissão, proteção, e baterias, cada setor gerou a sua própria matriz de comparação que pode ser vista nas Tabelas 6 a 10. Depois foi calculada a média aritmética de todos os resultados obtidos para cada variável de interesse e foram-lhes atribuídos os seguintes pesos: 0,054 para o número total de células, 0,136 para o número de células em paralelo, 0,252 para a massa das células, 0,396 para o volume das células, 0,088 para a corrente de descarga máxima e 0,074 para o preço.

Tabela 3 – Topologia e características do BESS para cada célula.

Modelo	$N_s$	$N_p$	$N_T$	$m_p$	$V_{ol.p}$	Energia consumida (kWh)	Energia disponível (kWh)
Modelo 4	20	3	60	26	12.2	5.369	5.472
Modelo 40	20	4	80	27	11.6	5.36	5.42
...	...	...	...	...	...	...	...
Modelo 1158	21	1194	25074	51	25	5.364	5.566

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 4 – Topologia e características normalizadas de BESS para cada célula.

Modelo	$N_T$	$N_p$	Maxima corrente de descarga	$m_p$	Preço	$V_{ol.p}$
Modelo 4	1	0.997	0.982	0.972	0.999	0.961
Modelo 40	0.998	0.995	0.954	0.772	0.997	0.809
...	...	...	...	...	...	...
Modelo 1158	0	0	0.348	0.333	0	0.481

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 5 – Matriz de Comparação do setor de aerodinâmica, CI = 0,082.

	$N_T$	preço	Maxima corrente de descarga	$N_p$	$m_p$	$V_{ol.p}$	Peso resultante
$N_T$	1	1	1	1	0,2	0,11	0,06
preço	1	1	1	1	1	0,2	0,09
Maxima corrente de descarga	1	1	1	0,333	0,333	0,2	0,07
$N_p$	1	1	3	1	0,25	0,2	0,10
$m_p$	5	1	3	4	1	0,14	0,18
$V_{ol.p}$	9	5	5	5	7	1	0,50

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 6 – Matriz de Comparação do setor de estruturas, CI = 0,082.

	$N_T$	preço	Maxima corrente de descarga	$N_p$	$m_p$	$V_{ol.p}$	Peso resultante
$N_T$	1	1	1	3	0,14	0,11	0,08
preço	1	1	1	1	0,2	0,2	0,07
Maxima corrente de descarga	1	1	1	1	0,333	0,2	0,07
$N_p$	0,333	1	1	1	0,25	0,2	0,06
$m_p$	7	5	3	4	1	0,2	0,25
$V_{ol.p}$	9	5	5	5	5	1	0,47

Fonte: Autor, 2022.



Tabela 7 – Matriz de Comparação do setor de transmissão, CI = 0,082.

	$N_T$	preço	Maxima corrente de descarga	$N_p$	$m_p$	$V_{ol.p}$	Peso resultante
$N_T$	1	0,33	1	1	0,111	0,111	0,04
preço	3	1	1	0,333	0,111	0,111	0,05
Maxima corrente de descarga	1	1	1	1	0,111	0,111	0,05
$N_p$	1	3	1	1	0,14	0,14	0,06
$m_p$	9	9	9	7	1	0,25	0,32
$V_{ol.p}$	9	5	9	7	4	1	0,48

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 8 – Matriz de Comparação do setor de proteção, CI = 0,082.

	$N_T$	preço	Maxima corrente de descarga	$N_p$	$m_p$	$V_{ol.p}$	Peso resultante
$N_T$	1	0,2	1	1	0,14	0,13	0,04
preço	5	1	1	1	0,13	0,13	0,08
Maxima corrente de descarga	1	1	1	1	0,14	0,14	0,05
$N_p$	1	1	1	1	0,14	0,13	0,05
$m_p$	7	8	7	7	1	1	0,38
$V_{ol.p}$	8	8	7	8	1	1	0,39

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 9 – Matriz de Comparação do setor de baterias, CI = 0,082.

	$N_T$	preço	Maxima corrente de descarga	$N_p$	$m_p$	$V_{ol.p}$	Peso resultante
$N_T$	1	0,333	0,2	0,14	0,5	0,5	0,05
preço	3	1	0,2	0,14	0,5	0,5	0,07
Maxima corrente de descarga	5	5	1	0,17	2	1	0,20
$N_p$	6	7	6	1	2	2	0,41
$m_p$	2	2	0,5	0,5	1	1	0,13
$V_{ol.p}$	2	2	1	0,5	1	1	0,14

Fonte: Autor, 2022.

Tendo os coeficientes associados a cada parâmetro, a pontuação para cada célula foi calculada utilizando (9), em que "N" nesta análise é 6, " $C_N$ " é o valor característico descrito na Tabela 4, o caso seguinte é um exemplo dos passos de cálculo para a célula 4, utilizando os pesos obtidos e as informações da Tabela 4:

$$\sum P_N C_N = 1 \cdot 0,05 + 0,997 \cdot 0,136 + 0,982 \cdot 0,088 + 0,972 \cdot 0,252 + 0,999 \cdot 0,074 + 0,961 \cdot 0,396 = 0,975$$

A Tabela 11 apresenta os resultados da aplicação do método proposto. De acordo com o apresentado, observa-se que o BESS mais recomendado seria composto das células de bateria modelo 60, que formariam um BESS com um total de 88 células, pesando 27 kg e com um volume de 11,6 litros, contendo 22 células em série e 4 strings em paralelo. Pode-se ver que o BESS terá um peso de aproximadamente 10% da massa total do veículo e a energia que consumirá para realizar toda a viagem

é de 5,36 kWh, o que representa cerca de 98% da energia total disponível para uma profundidade de descarga de 80%. Analisando a ficha técnica do inversor, observa-se que a tensão nominal do BESS satisfaz suas necessidades de entrada, sendo capaz de fornecer uma tensão de 74 V e uma capacidade total de corrente de 96 Ah. Pode-se concluir, então, que o BESS e a célula selecionada atendem satisfatoriamente aos requisitos de projeto.

Tabela 11 – As três melhores células encontradas como resultado do algoritmo.

Modelo	Pontuação obtida
Modelo 60	0,998
Modelo 41	0,990
Modelo 4	0,975

Fonte: Autor, 2022.

### Validando o método proposto

A fim de validar a capacidade do método de escolher a melhor célula para constituir um BESS, o método apresentado anteriormente foi aplicado para tentar resolver o problema proposto em<sup>20</sup>. É importante notar que todos os dados necessários para a aplicação são disponibilizados pelos autores. Embora a pesquisa apresentada em<sup>20</sup> tenha um problema diferente daquele descrito neste artigo, esperava-se obter um resultado próximo ao apresentado pelos pesquisadores, no qual foi mostrado "célula 10" como a melhor opção e "célula 9" como a pior.

Para a validação, os mesmos passos descritos na terceira seção foram seguidos, e o resultado obtido pode ser visto na Tabela 12. Analisando a tabela, é possível notar que o resultado do método proposto foi assertivo ao definir "célula 10" como a melhor opção e "célula 9" como a pior. Além disso, vale mencionar que a "célula 2" foi determinada como a 3ª opção, enquanto que em<sup>20</sup> ela foi colocada em 2ª. As diferenças entre os resultados podem ser explicadas devido à diferença na natureza dos parâmetros levados em consideração no método AHP. Entretanto, o método proposto demonstra ser muito consistente na seleção da melhor opção

para constituir um BESS.

Tabela 12 – Pontuação obtida ao aplicar o método às células propostas em<sup>20</sup>.

Modelo	Pontuação obtida
Célula 10	0,9308
Célula 14	0,9242
Célula 2	0,9060
...	...
Célula 9	0,0624

Fonte: Autor, 2022.

## CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o método desenvolvido para o dimensionamento e seleção de baterias para o BESS de um EV, no qual um veículo SAE do tipo fórmula foi utilizado como um estudo de caso. Este estudo destaca a relevância do cumprimento das demandas específicas de energia, bem como a ponderação de parâmetros que abrangem as características das células da bateria e seu arranjo de conexões. Foi observado que para ambos os estudos de caso, células com uma maior densidade de energia e menor custo por unidade de armazenamento de energia sempre leva aos melhores resultados em comparação com as outras células. Além disso, os resultados dos testes demonstraram que o método ajuda na tomada de decisão sobre o tipo de célula a ser escolhida, visto que ele indica a célula mais adequada para o arranjo e as principais características do BESS.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> SUN X., et al. Technology Development of Electric Vehicles: A Review. **Energies**, v. 13, nº 1, p. 90, 2019.
- <sup>2</sup> GLOBAL EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive? Technology report. **International Energy Agency**, Junho 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. Acesso em: 16 mai. 2022.
- <sup>3</sup> NUNNA H. S. V. S. K., et al Energy Management in Smart Distribution Systems with Vehicle-to-Grid Integrated Microgrids. in **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, no. 5, pp. 4004-4016, Sept. 2018.
- <sup>4</sup> ANDERVAZH M. R., et al Active distribution network operation management with large penetration of hybrid electric vehicles and sustainable distributed energy generation, **Sustainable Cities and Society**, v. 62, Nov. 2020.
- <sup>5</sup> HUSSAIN A, et al Optimal Sizing of Battery Energy Storage System in a Fast EV Charging Station Considering Power Outages, **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 6, no. 2, pp. 453-463, June 2020.
- <sup>6</sup> HAYES J. G. et al Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles, **Hoboken, N J: John Wiley & Sons**, 557 p. 2018.
- <sup>7</sup> DENG J. et al. Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges, **Joule**, v. 4, nº 3, pp. 509–515, 2020.
- <sup>8</sup> ISMAIL A. et al, Study of Electric Vehicle Battery Reliability Improvement, **International Journal of Reliability and Applications** v. 12, No. 2, pp. 123-129, 2011.
- <sup>9</sup> GARG M. et al, Model-based sizing of battery packs for minimum cost, **2017 American Control Conference (ACC)**, Seattle, WA, pp. 4159-4164, 2017.
- <sup>10</sup> DUANGSRIKAEW B. et al Battery Sizing for Electric Vehicles Based on Real Driving Patterns in Thailand, **World Electric Vehicle Journal**, v. 10, nº 2, p 43, 2019.
- <sup>11</sup> ELY T. O. et al, Batteries Safety: Recent Progress and Current Challenges. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, p 71, 2019.
- <sup>12</sup> SEVERINO B., et al, multi-objective optimal design of lithium-ion battery packs based on evolutionary algorithms. **Journal of Power Sources**, v. 267, p. 288-299, 2014.
- <sup>13</sup> WU X. et al, Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation, **Transportation Research Part D Transport and Environment**, v. 34, pp. 52-67, 2015.
- <sup>14</sup> MIRI I et al, Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study, **International Journal of Energy Research**, v. 45, nº 1, pp. 501-520, 2020.
- <sup>15</sup> PELLETIER L. et al, Sizing of a Battery Pack Based on Series/Parallel Configurations for a High-Power Electric Vehicle as a Constrained Optimization Problem, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 69, no. 12, pp. 14150-14159, 2020.
- <sup>16</sup> SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE), **Fórmula SAE**. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programasestudanti/s/formula-sae-brasil/>. Acessado em 16 de mai. de 2022.

<sup>17</sup> KONIAK M. *et al*, Selection of the battery pack parameters for an electric vehicle based on performance requirements, **International Conference on Aerospace** 2017.

<sup>18</sup> AISHWARYA P. *et al* Multi-Objective Optimization in Battery Selection for Hybrid Electric Vehicle Applications., **Journal of Electrical Systems**. v. 12. P. 325-343, 2016

<sup>19</sup> ZEYUAN, Yu. Selection of Solar Cell based on TOPSIS Method. **International Conference on Advanced Information Engineering and Education Science (ICAIEES 2013)**. 2013.

<sup>20</sup> BAŠIĆ H., *et al* Experimental Testing and Evaluation of Lithium-Ion Battery Cells for a Special-Purpose Electric Vacuum Sweeper Vehicle, **IEEE Access**, v. 8, pp. 216308-216319, 2020.

<sup>21</sup> WEG, **Inversor de Frequência para Tração Elétrica CVW300 - Manual do Usuário**. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h83/h93/WEG-cvw300-manual-do-usuario-10001832424-2.0x-manual-portugues-br.pdf>. Acessado em 16 de maio de 2022.

<sup>22</sup> SAATY T.L., How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process, **European Journal of Operational Research**, v. 48, pp. 9-26,1990.