









do veículo elétrico, incluindo um modelo detalhado da bateria (ABDELHAFIZ; FOUUDA; RADWAN, 2023). Portanto, é de vital importância determinar os parâmetros de uma célula de bateria de íon-lítio, pois esses são a base para projetar o BMS e também ajudam a compreender os processos físico-químicos subjacentes responsáveis pela degradação do envelhecimento das baterias.

Este trabalho tem como objetivo investigar teoricamente o comportamento de uma célula de bateria de íon-lítio com aplicabilidade para veículos elétricos durante o carregamento e definir através de simulações via software MATLAB/Simulink as curvas de tensão, corrente e estado da carga ao decorrer do tempo. Para isto, o mesmo encontra-se dividido em cinco (5) itens, sendo a Introdução para contextualizar ao leitor o problema da pesquisa, a relevância do trabalho, e delinear os objetivos e a estrutura do artigo. A Metodologia, abordando os métodos e procedimentos utilizados para a pesquisa. O Embasamento Teórico, trazendo a revisão de literatura existente e fornecendo a base conceitual e a fundamentação para a pesquisa. Os Resultados e Discussões, onde são apresentados o desenvolvimento e as soluções encontradas e, por fim, as Considerações Finais, trazendo reflexões sobre o trabalho como um todo.

## **METODOLOGIA**

Neste artigo é apresentado um método de abordagem bibliográfica, quantitativa e aplicada. A pesquisa fundamenta-se em informações provenientes de livros, dissertações, projetos, artigos e outros documentos escritos, complementando-se com a utilização de dados empíricos que proporcionam resultados precisos e próximos à realidade.

O primeiro passo neste estudo é realizar uma revisão bibliográfica. Abordando algumas tecnologias e métodos que se referem à carga e descarga de baterias, com foco nas baterias de íon-lítio. Nesse sentido, também são investigados os fundamentos teóricos que possibilitam a modelagem da curva de carga de uma bateria.

A segunda parte do trabalho aborda o estudo e desenvolvimento da modelagem da curva de carga de uma bateria de íon-lítio, baseando-se em modelos e cálculos previamente estabelecidos na literatura. Para isso, foi selecionada uma bateria de íon-lítio comercial, cujos parâmetros elétricos foram extraídos e aplicados ao modelo desenvolvido. Em seguida, foram realizadas simulações computacionais para analisar os comportamentos da tensão, corrente e



estado de carga (SOC) da bateria durante o período de carregamento através do software MATLAB/Simulink.

Por fim, são apresentados os resultados da pesquisa e são discutidas algumas considerações.

## **EMBASAMENTO TEÓRICO**

Os carros elétricos estão ganhando cada vez mais espaço na indústria automobilística e de transportes, visto que estes apresentam uma alternativa sustentável aos veículos movidos a combustíveis fósseis. Os VEs ajudam a mitigar parte das emissões de GEE e apresentam uma eficiência de conversão energética superior à combustão, ainda utilizada pela maioria dos veículos utilitários e particulares ao redor do mundo (“Global EV Outlook 2023”, 2023). Além disso, os avanços das tecnologias que envolvem as baterias e a melhoria dos sistemas da infraestrutura para carregamento de VEs estão tornando os veículos elétricos mais triviais e acessíveis para os consumidores em geral. Como consequência dessas ponderações, a demanda por veículos elétricos está crescendo rapidamente, impulsionando inovações contínuas no setor.

Os veículos elétricos em geral possuem como principal componente de fabricação a bateria em si. De acordo com Viera (2019), a bateria é o componente-chave dos veículos elétricos (VEs), que incluem os veículos elétricos a bateria (BEVs), os veículos elétricos híbridos (HEVs) e os veículos híbridos *plug-in* (PHEVs), influenciando diretamente em seu custo, peso, autonomia e confiabilidade, por isso essas vem se tornando cada vez mais amplamente estudadas e estão em constante evolução. Atualmente, como citado anteriormente, as baterias de íon-lítio são as mais utilizadas devido às suas características, principalmente por apresentarem uma alta densidade de potência e de energia (LIU et al., 2022).



Figura 1 - Bateria de íon-lítio comercial. **Fonte:** Amazon (2024).

Além das questões de autonomia, eficiência e custos de uma bateria, um outro fator se demonstra extremamente relevante, que é a vida útil da bateria. Todas as baterias se degradam com o tempo e uso, a maioria dos VEs tem uma garantia de oito anos ou 160.000 km. Uma bateria pode ser considerada no fim de sua vida útil se não for capaz de armazenar mais de 80% da sua capacidade total utilizável e apresentar uma taxa de autodescarga superior a 5% no período de um dia (24 horas) (MOTHILAL BHAGAVATHY et al., 2021). Ainda, Mothilal Bhagavathy et al. (2021) traz à tona que a vida útil da bateria pode sofrer degradação por causa dos diferentes padrões de carga e descarga, como o uso repetido da capacidade total da bateria ou a recarga rápida repetida.

Para mitigar e monitorar os efeitos do carregamento e descarga das baterias, foram criados os sistemas de gerenciamento de bateria (BMS) (ABDELHAFIZ; FOUUDA; RADWAN, 2023). Como visto anteriormente, para garantir que a bateria funcione de forma segura e confiável, é necessário se ter conhecimento e controle da temperatura, corrente e tensão da bateria, estimando em tempo real os estados da bateria. No entanto, medir os estados das baterias, como o estado de carga (SOC) e o estado de saúde (SOH), são procedimentos complicados devido ao complexo processo eletroquímico das baterias e aos diversos fatores de influência na aplicação prática, tais como velocidade, temperatura, peso, entre outros (PLETT, 2004).

Por isso, o método de estimativa baseado em modelos de bateria é amplamente utilizado, pois estes se apresentam como modelos agregados de relativamente poucos parâmetros, facilitando o entendimento das mesmas. Tais modelos são propostos justamente com o propósito de controle de gerenciamento de energia do VE e para o desenvolvimento de BMS (HE; XIONG; FAN, 2011). Na literatura, existem três tipos de



modelos: experimentais, eletroquímicos e os baseados em circuitos elétricos equivalentes. O primeiro não apresenta dados suficientes para ser utilizado com o propósito de estimar o estado de carga (SOC), enquanto o segundo utiliza equações diferenciais parciais (EDPs) com vários parâmetros desconhecidos resultando em uma grande demanda de memória e custo computacional, tornando-se indesejável para projetos de BMS (SMITH; RAHN; WANG, 2010).

Os modelos baseados em circuitos elétricos equivalentes são os mais práticos para representar as características elétricas da bateria. De acordo com Tremblay e Dessaint (2009), existem vários modelos elétricos, alguns mais simples que consistem apenas em uma fonte de tensão ideal em série com uma resistência interna e alguns mais robustos onde a identificação dos parâmetros é baseada na técnica de espectroscopia de impedância, algo extremamente complexo. Dentre os vários modelos, o modelo de Shepherd desenvolveu uma equação para descrever o comportamento eletroquímico de uma bateria diretamente em termos de tensão terminal, tensão de circuito aberto, resistência interna, corrente de descarga e estado de carga, podendo este ser aplicado tanto para descarga quanto para carga.

## RESULTADO E DISCUSSÕES

O modelo utilizado para esta pesquisa utiliza a metodologia empregada por Tremblay e Dessaint (2009) com o circuito equivalente de carregamento elaborado por Marra et al. (2012), conforme figura 2-a e 2-b. Ainda, para o *pack* de cem baterias em série foi utilizado o modelo comercial da EAS Batteries, a MP602030 LFP 50 Ah (“Medium Power LFP 50Ah”, [s.d.]).

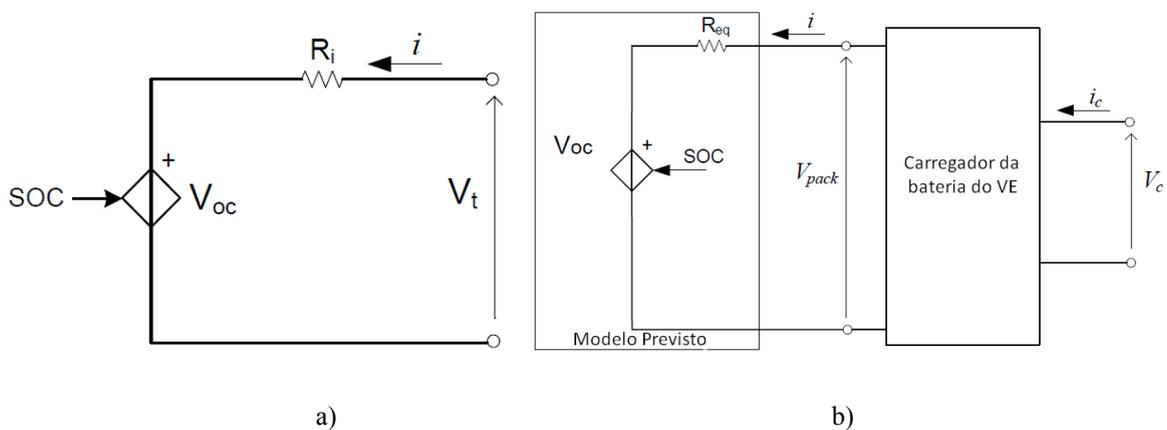


Figura 2-a) Modelo da bateria do VE. **Fonte:** Marra et al. (2012). 2-a) Modelo do carregamento do VE. **Fonte:** Marra et al. (2012).



Para o modelo em questão, SOC é o estado de carga da bateria, que nada mais é do que a relação entre a capacidade real armazenada na bateria ( $Q$ ) e a capacidade nominal da bateria ( $Q_{nom}$ ), ambas dadas em ampere-hora (Ah).  $V_c$  e  $I_c$  são respectivamente a tensão em volts (V) e a corrente em ampere (A) da rede, enquanto  $V_{pack}$  e  $I$  são respectivamente a tensão do conjunto de baterias (V) e a corrente CC aplicada para a carga ou descarga das mesmas (A).  $V_t$  é a tensão no terminal de cada célula de bateria (V),  $R_i$  é a resistência interna ( $\Omega$ ) e  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto (V) que pode ser expresso matematicamente por (TREMBLAY; DESSAINT; DEKKICHE, 2007):

$$V_{oc} = E_o - K \cdot \frac{Q_{nom}}{Q_{nom} - Q} + A \cdot e^{(-B \cdot Q)}$$

onde,  $E_o$  é a tensão de carga/descarga constante da bateria (V),  $K$  é a tensão de polarização (V),  $A$  é a amplitude da zona de tensão exponencial (V) e  $B$  é a capacidade exponencial ou constante de tempo inversa exponencial ( $Ah^{-1}$ ). Estes parâmetros são estimados através da curva de descarga da célula de bateria. Alguns fabricantes fornecem alguns destes dados no *datasheet* da bateria, algo que não se aplica a este caso, portanto foi necessário simular a curva de descarga da bateria escolhida.

O software Simulink disponibiliza um bloco de bateria genérico que pode ser configurado para simular a curva de descarga de uma bateria qualquer, facilitando o processo de obtenção de tais parâmetros. Neste caso, o bloco foi configurado para representar a curva de descarga de uma bateria do tipo LFP com parâmetros construtivos conforme *datasheet* da mesma.

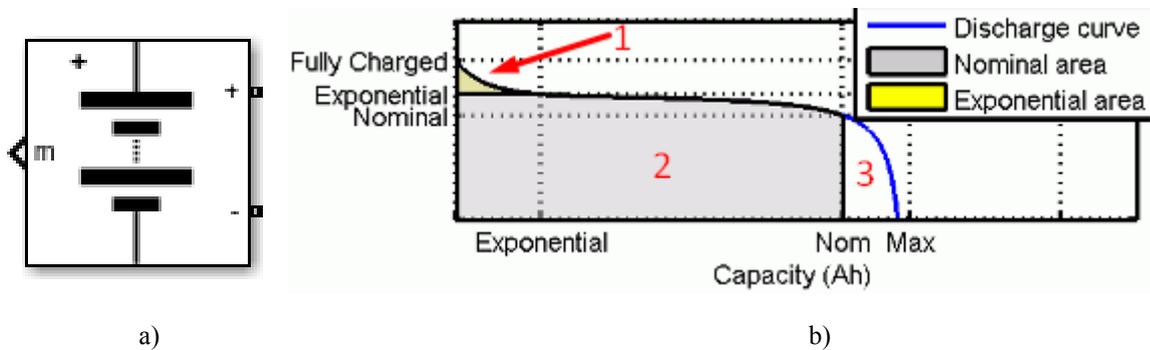


Figura 3-a) Bloco de bateria genérico do Simulink. **Fonte:** Simulink (2024). 3-b) Curva de descarga genérica. **Fonte:** Simulink (2024).

A seção um (1) representa a queda de tensão exponencial. A seção dois (2) representa a carga que pode ser extraída da bateria enquanto essa não atinge um valor abaixo



de sua tensão nominal. A última seção (3) representa a descarga total da bateria, quando a tensão cai abruptamente. Com essas seções bem definidas, é possível calcular os parâmetros  $E_0$ ,  $K$ ,  $A$  e  $B$ . Embora estes tenham sido calculados utilizando os métodos de Tremblay e Dessaint (2007), o próprio Simulink gera os valores para tais incógnitas e reduzem a chance de erro humano.

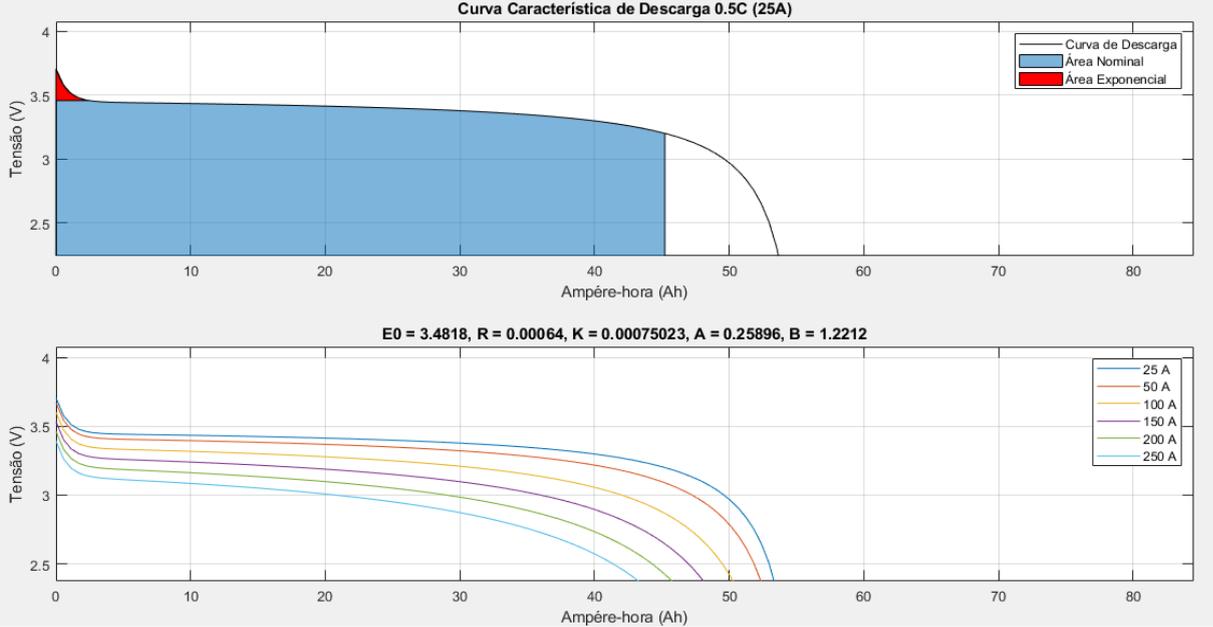


Figura 4 - Simulação da curva de descarga em 0,5C (V/Ah). Fonte: Autor (2024).

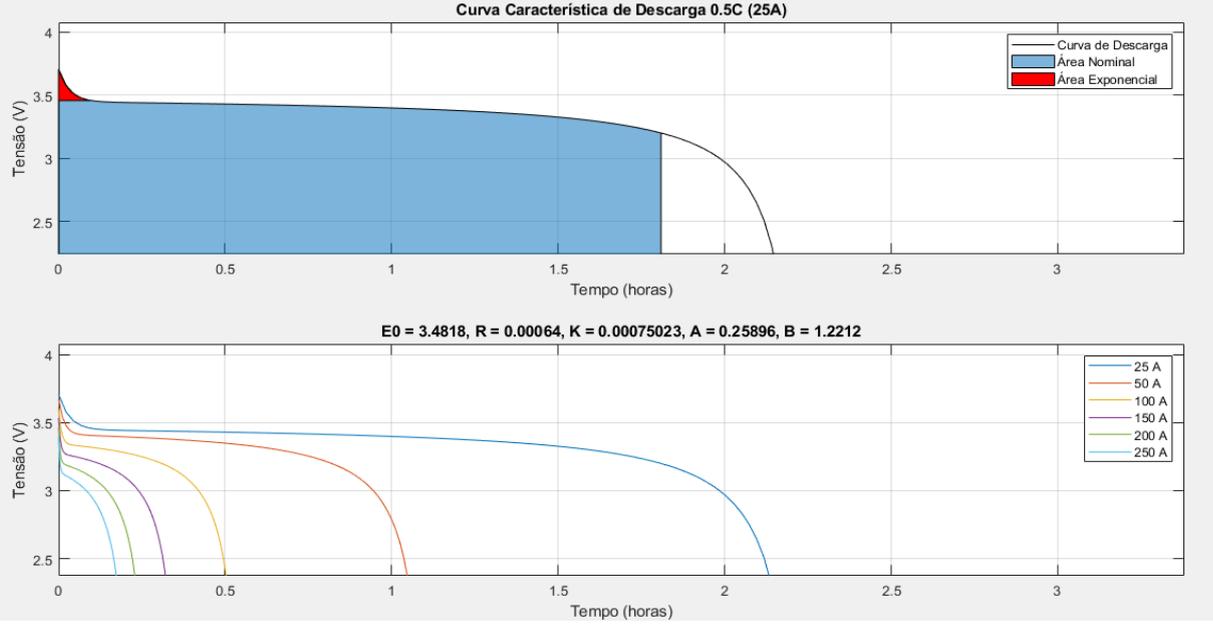


Figura 5 - Simulação da curva de descarga em 0,5C (V/h). Fonte: Autor (2024).



Os dados retirados do *datasheet* da bateria foram utilizados no bloco do Simulink, obtendo as curvas e parâmetros representados pelas figuras 4 e 5. É importante observar que as curvas são geradas com uma corrente de 0,5C, que seria a corrente ideal de carregamento definida pelo fabricante. Os padrões de carga/descarga são medidos através da taxa 'C' por hora, isto é, se a carga/descarga é taxada em 1C, significa que a bateria estará completamente carregada/descarregada em 1 hora naquele nível de corrente (MOTHILAL BHAGAVATHY et al., 2021).

Com os parâmetros definidos, foi elaborado um código (“*script*”) no MATLAB para validar o comportamento da tensão do circuito aberto durante o carregamento, resultando na curva apresentada na figura 6.

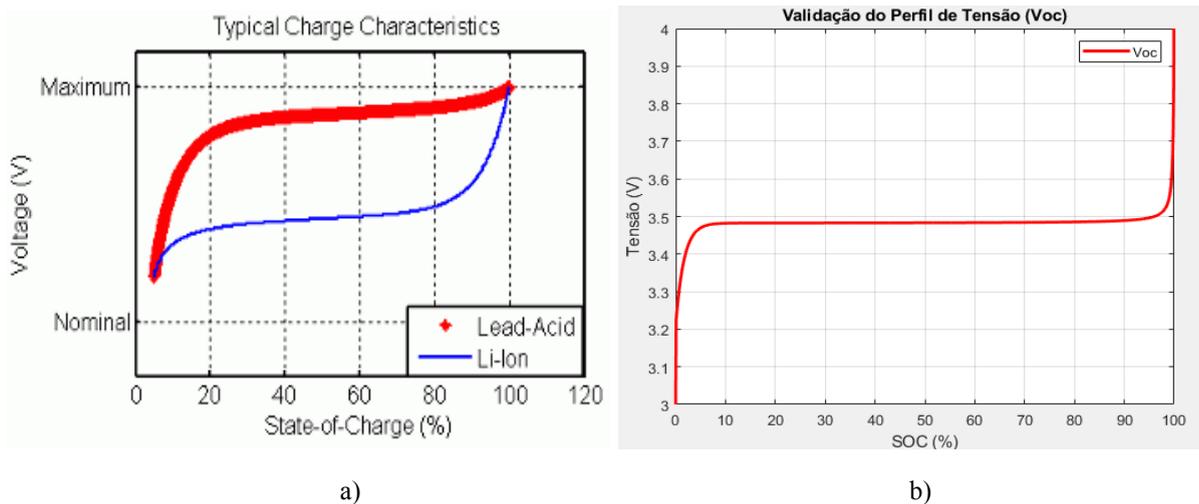
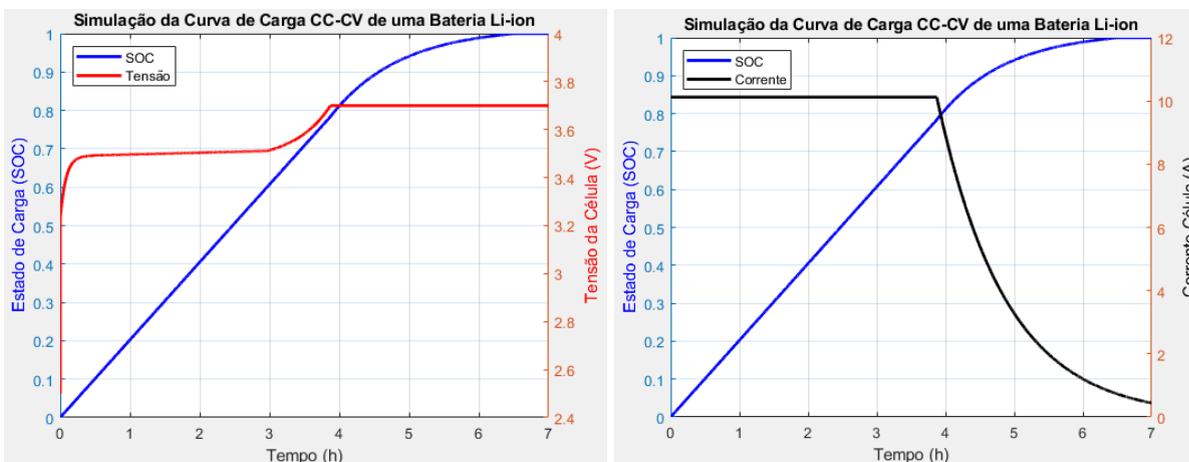


Figura 6-a) Comportamento esperado da tensão quando em carregamento. **Fonte:** Simulink (2024). 6-b) Comportamento obtido na simulação. **Fonte:** Autor (2024).

Como pode-se observar ao comparar a figura 6-a com a figura 6-b, a tensão em Voc mostra um comportamento muito similar ao que era esperado na simulação, confirmando que os parâmetros extraídos estão corretos. Com isto, é possível partir para o modelo do carregamento em si.

Para determinar  $V_c$ ,  $I_c$ ,  $I$  e  $V_{pack}$ , é necessário saber o padrão de carga da rede, de acordo com Marra et al. (2012), a norma IEC 61850 coloca como mais usual para o carregamento residencial o padrão de entrada monofásico de 230 V e 16 A no contexto global. Portanto, este trabalho foi elaborado utilizando estes valores para  $V_c$  e  $I_c$ .  $V_{pack}$  nada mais é do que o somatório da tensão nominal de todas as baterias, totalizando 320 V, e, com isto, é possível calcular a corrente  $I$  porque a potência da rede é a mesma do carregador

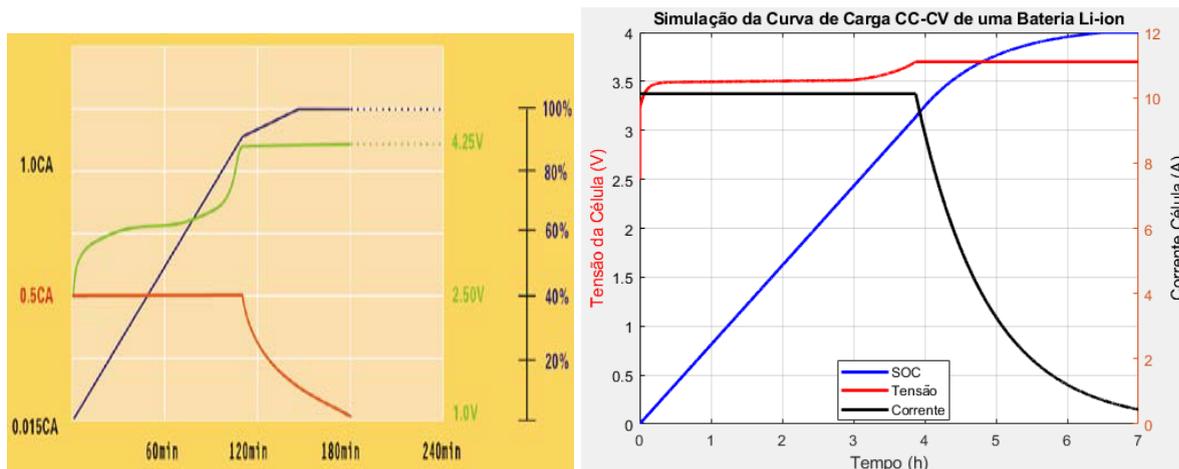




a)

b)

Figura 7-a) Comportamento da tensão obtido na simulação (SOC x V). **Fonte:** Autor (2024). 7-b) Comportamento da corrente obtida na simulação (SOC x I). **Fonte:** Autor (2024).



a)

b)

Figura 8-a) Comportamento esperado do sistema de carregamento. **Fonte:** Marra et al. (2012). 8-b) Comportamento obtido na simulação. **Fonte:** Autor (2024).

Como pode-se observar nas figuras 7 e 8, o sistema se comportou como foi projetado para se comportar e apresentou resultados satisfatórios, visto que a transição entre os estágios de carregamento ocorreram dentro da faixa e não extrapolam os limites de tensão e SOC da bateria.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo projetado atende aos objetivos propostos por este trabalho e representa com acuidade a metodologia de carregamento CC-CV para baterias do tipo LFP. Ainda, os





DEVI, A.; MOH ZAENAL EFENDI; ONY ASRARUL QUDSI. **Design of Battery Charging System with CC-CV Method Using Interleaved Buck-Boost Converter.** Journal of electrical technology UMY, v. 7, n. 1, p. 38–47, 3 abr. 2024.

Global EV Outlook 2023. 26 abr. 2023.

HAFNER, M.; LUCIANI, G. **The Palgrave handbook of international energy economics.** Cham, Switzerland: Palgrave Macmillan, 2022.

HE, H.; XIONG, R.; FAN, J. **Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach.** Energies, v. 4, n. 4, p. 582–598, 29 mar. 2011.

LIU, Z. et al. **Self-discharge prediction method for lithium-ion batteries based on improved support vector machine.** Journal of energy storage, v. 55, p. 105571–105571, 1 nov. 2022.

LU, L. et al. **A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles.** Journal of Power Sources, v. 226, p. 272–288, mar. 2013.

MARRA, F. et al. **Demand profile study of battery electric vehicle under different charging options.** 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, jul. 2012.

**Medium Power LFP 50Ah — EAS Batteries.** Disponível em: <<https://eas-batteries.com/products/medium-power-lfp-50ah>>. Acesso em: 21 jul. 2024.

MISHRA, S. **Why a BMS is crucial for EV batteries.** Disponível em: <<https://www.electronicshub2b.com/industry-buzz/bms-crucial-ev-batteries/>>.





TREMBLAY, O.; DESSAINT, LOUIS-A.; DEKKICHE, A.-I. **A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles.** 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, set. 2007.

VIERA, L. A. B. **Projeto e implementação de um sistema de tração com freio regenerativo para veículos elétricos.** Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em engenharia elétrica) - universidade regional do noroeste do estado do rio grande do sul, 2019. 2019.