

Eletro mobilidade

Vitor Luís da Silva Junior

vitor.luis@aedb.br

AEDB

Vicente de Paulo Virturino

vicente.paulo@aedb.br

AEDB

Luiz Feraanando Ribas Monteiro

luiz.ribas@aedb.br

AEDB

Resumo: A eletro mobilidade renasce com um grande desafio de ser um produto que realmente se mantenha no mercado e não seja más uma vez um produto sem aceitação no mercado, com tudo temos além dos cuidados e precauções, um velho desafio que são a sustentabilidade da sua geração de energia focada o desenvolvimento das baterias de lítio, que apesar da sua evolução tem seus desafios para os veículos elétricos.

Palavras Chave: Eletro Mobilidade - Baterias Lítio - Sustentabilidade - -

1. Introdução

Este projeto trata-se da modelagem de baterias de íon-lítio e de um estudo comparativo de estimativa do estado de carga de veículos elétricos, a abordagem de modelagem foi realizada utilizando circuitos equivalentes com detalhamento das variáveis e parâmetros que influenciam o processo, dando um foco crítico na análise dos métodos existentes. Na metodologia foi utilizada a parte conceitual de fundamentação teórica, passando em seguida para as etapas de modelagem, análise, conclusão da análise e mensuração, o método de estimativa de contagem de Coulomb estima o estado de carga da bateria com base na integral da corrente elétrica ao longo do tempo, apesar de simples, por ser em malha aberta, possui erros acumulativos, as metodologias foram comparadas entre si em termos de precisão e exatidão utilizando algumas ferramentas. Os modelos provaram ser satisfatórios e os resultados fornecem *insights* sobre a eficácia e eficiência das abordagens propostas, o estudo através desta pesquisa visa abordar as características da geração de energia elétrica veicular, quais tipos de células de baterias são utilizadas atualmente, qual será a sua vida útil se ela é segura e a sua capacidade, além disso, como será feito o descarte e os tipos de incentivos e investimentos dentro da área, as perspectivas futuras no desenvolvimento em células de baterias, quais tipos de matérias e suas aplicações em escala a longo médio e curto prazo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Coulomb Counting

A Contagem *Ampère-hora* (*Coulomb Counting*) consiste no uso da integral da corrente de carga/descarga no cálculo da capacidade restante na bateria, e de fácil implementação e baixa complexidade computacional, porém, exige conhecimento do estado inicial de carga e apresenta baixa precisão, além de depender de parâmetros sujeitos a erros de medição (PURWADI et al., 2014).

Open Circuit Voltage - OCV usa a relação entre força eletromotriz e SoC na estimação do estado, tem alta precisão e baixa complexidade computacional, contudo, apresenta uma limitação no número de aplicações devido a necessidade, por exemplo, de sensores de tensão com alta resolução (ZHANG et al., 2018). Impedância e Resistência Interna, a partir dos estados e temperatura com valores fixos, usa-se os

valores de impedância e resistência interna da bateria no processo de estimação, é baseada em características intrínsecas à bateria sob qualquer excitação de corrente, porém, a difícil medição da impedância e da resistência interna elevam o custo de implementação, além de apresentar relação entre SoC e impedância não estável (ZHANG et al., 2018). Identifica a quantidade de lítio nos eletrodos e emprega equações diferenciais parciais na estimação do SoC, tem alta precisão na estimação teórica e é aplicável em estimativas com o equipamento fora de operação (*offline*), contudo, tem alta complexidade de implementação e alta dificuldade para realizar a estimação com o sistema em operação (*online*) (XIONG et al., 2018). Baseado no modelo da bateria usa elementos de circuito elétrico para modelar a bateria e, a partir deles, estimar o SoC, tem boa precisão na estimação dos estados com o sistema em operação (*online*), porém, não representa algumas características da bateria, como efeitos de histerese (XIONG et al., 2018).

2.2 Implementação dos Métodos de Estimação

Determinação do modelo em espaço de estados. Para que o filtro de Kalman seja empregado, o modelo da bateria deve estar representado na forma de espaço de estados em tempo discreto. Portanto, após a modelagem do sistema, é necessário determinar as equações de processo e de saída que representam seu comportamento. Neste trabalho, serão considerados como estados do sistema o SoC e as tensões sobre os ramos R_C , V_1 e V_2 , existentes no modelo elétrico. Assim, é preciso definir as equações que representam o comportamento desses estados do sistema em tempo contínuo para posterior processo de discretização. O estado de carga da bateria é o estado mais importante do modelo e geralmente é definido pelo método *Coulomb Counting*. A equação (1) que define o SoC da bateria, em tempo contínuo, Nela, a corrente de entrada I do sistema é integrada ao longo do tempo, sendo $SoC(t_1)$ o estado de carga da bateria em um instante inicial; C_n a capacidade da bateria (que irá depender da temperatura do ensaio); η é a constante de Coulomb geralmente igual à 0,98).

$$SoC(t_2) = SoC(t_1) + \frac{\eta}{C_n} \int_{(t_1)}^{t_2} I(t)dt \quad (1)$$

$SOC(t)$: Estado de carga no tempo (t);

(n) : Número de células ou um fator de escala;

(c_n) : Capacidade nominal da bateria;

$i(t)$: Corrente em função do tempo,

$\int_{(t_1)}^{t_2} I(t)dt$: Integral da corrente no intervalo de tempo de (t_1) a (t_2) .

O método de *Coulomb Counting* necessita de medições precisas da corrente e uma boa inicialização do estado para diminuir os impactos de erros no processo de estimação. Assim, esse método será usado em conjunto com um filtro de Kalman, conhecido por sua autocorreção do erro de covariância durante a operação do sistema. Assim, a equação (2 e 3) deve estar discretizada de acordo com a expressão, com $t_1 = k\Delta t$ e $t_2 = (k + 1)\Delta t$ sendo Δt o período de amostragem.

A equação que define o SoC da bateria, em tempo discreto, está expressa em:

$$SoC((k + 1)\Delta t) = Soc(k\Delta t) + \frac{n\Delta t}{c_n} I(k\Delta t) \quad (2)$$

$$SoC[k + 1] = Soc[k] + \frac{n\Delta t}{c_n} I[k] \quad (3)$$

SOC: Estado da carga;

k : Índice do passo de tempo discreto;

Δt : Duração do intervalo de tempo;

n : Número de células ou um fator de escala;

c_n : Capacidade nominal da bateria,

I : Corrente na etapa de tempo discreta.

As tensões sobre os ramos RC também são consideradas estados do sistema, sendo necessário determinar as expressões que regem seus comportamentos assim, com base no modelo elétrico, nas leis de Kirchhoff e nas características transitórias do modelo, a tensão de saída do sistema Y e a corrente I que circula através dele podem ser expressas, em tempo contínuo respectivamente nas equações (4 e 5).

$$Y = V_{oc} - V_1 - V_2 - R_{int}I \quad (4)$$

$$I = \frac{V_1}{R_1} + C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2}{R_2} + C_2 \frac{dV_2}{dt} \quad (5)$$

Y : Tensão de saída;

V_{oc} : Tensão de circuito aberto;

R_{int} : Resistência interna;

I : Corrente;

V_1 e V_2 : São as quedas de tensão nos resistores (R_1) and (R_2) , respectivamente;

C_1 and C_2 : São os capacitores,

$\frac{dV_1}{dt}$ e $\frac{dV_2}{dt}$: São quedas de tensões nos capacitores (C_1) e (C_2), respectivamente.

Portanto, as tensões sobre os ramos RC podem ser expressas na forma de equações (6 e 7) diferenciais como apresentado (TOPAN et al., 2016).

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1} \quad (6)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{R_2 C_2} + \frac{I}{C_2} \quad (7)$$

$\frac{dV_1}{dt}$ e $\frac{dV_2}{dt}$: São quedas de tensões nos capacitores (C_1) e (C_2), respectivamente.

V_1 e V_2 : São as tensões nos capacitores.

R_1 e R_2 : São as resistências em série com os capacitores.

I : É a corrente que flui pelo circuito.

3. Desenvolvimento

Os principais conceitos relacionados à modelagem da bateria e aos métodos empregados na estimação de estados em sistemas não-lineares dinâmicos, objetivando assim, melhorar a compreensão sobre o tema, a estimação do estado de carga em uma bateria é fundamental para otimizar o gerenciamento de energia dos dispositivos aos quais esse sistema está associado, contudo, é necessário que esse processo seja realizado de maneira precisa para que, além de indicar a carga armazenada disponível em comparação com a carga total da bateria, sejam evitadas descargas profundas ou sobrecargas, que possam danificar o sistema (MISYRIS et al., 2019). Portanto, uma boa estimação aumenta a durabilidade e melhora o desempenho da bateria, evitando situações que põem em risco usuários e dispositivos, ao contrário de outras grandezas presentes na bateria que podem ser medidas por sensores, como, por exemplo, tensão de saída, corrente de descarga e temperatura, o SoC não pode ser obtido diretamente, exigindo o uso de métodos indiretos que viabilizem a sua estimação de maneira precisa e confiável (RAHIMI-EICHI et al., 2013), assim, a partir de medições diretas, o SoC é determinado indiretamente, existe uma série de técnicas empregadas na estimação de SoC em sistemas de armazenamento de energia, disponibilizadas na bibliografia científica, variando principalmente em relação à precisão de estimação ou na complexidade de implementação conforme figura 1, (ZHANG et al., 2018) realizaram uma revisão detalhada sobre o tema, no estudo, os autores organizaram os métodos em

cinco categorias principais, sendo elas: convencional, filtro adaptativo, inteligência artificial adaptativa, observador não-linear e algoritmo híbrido.



Figura: 1 Ciclo de Desenvolvimento do Projeto. Fonte: Autor 2024

3.1 Materiais e Métodos

Impacto do envelhecimento da bateria na estimação do SoC, a mudança do SoH impacta no cálculo do SoC ao longo do tempo, a partir do princípio que a capacidade de retenção de carga da bateria cai no decorrer do tempo, é racional imaginar que o maior impacto ocorre na autonomia do veículo, porque a potência demandada pelo sistema, permanece a mesma e a bateria consegue suprir. Dessa forma, a autonomia do veículo cai diretamente proporcional com o decaimento do SoH, e para a leitura do SoC ser correta, é preciso realizar uma calibração da energia da bateria conforme a figura 2.

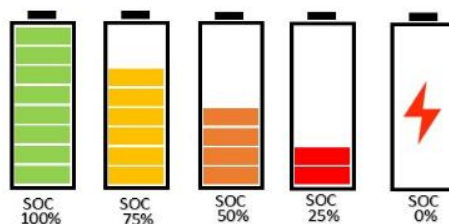


Figura 2 – Percentual de Carga

© HIOKI E.E. CORPORATION 2021

Os veículos elétricos a bateria (BEVs) estão se tornando mais populares no mundo de hoje, à medida que avançam em direção à descarbonização, os BEVs, como os veículos com motor de combustão interna, requerem manutenção para mantê-los funcionando, o teste de resistência de isolamento é uma parte essencial da manutenção e inspeção para evitar choques elétricos de BEVs. Isso é especialmente verdadeiro, pois o teste verifica o isolamento adequado que protege contra as tensões perigosamente altas dos VEs, além disso, este teste continuará a crescer em importância, pois o mercado de VEs continua aumentando as tensões dos VEs ano após ano, nesta nota de aplicação, abordaremos testes de resistência de isolamento para manutenção e inspeção de BEVs.

3.2 Fluxo de Medição de Isolamento

Neste teste, ao realizar as medições foi constatado que não há falhas no isolamento entre o sistema de alta tensão (AT) e o terra. Para referência, os locais das medições são rotulados da seguinte forma conforme a figura 3:

- A: Inversor, motor etc.
- B: Chassi
- C: Cabo de alta tensão
- D: Baterias HV

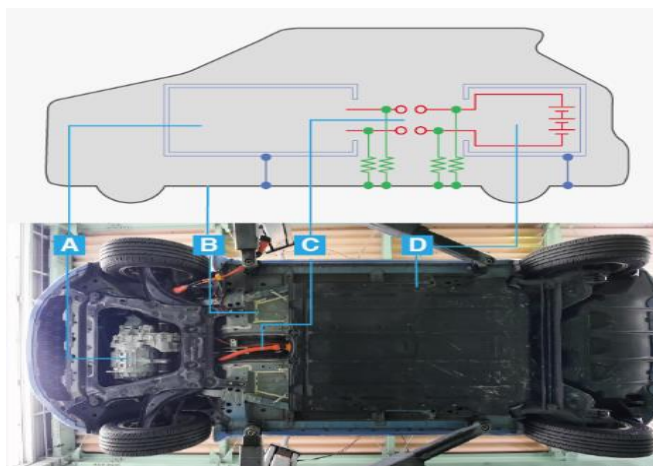


Figura 3 – Pontos de Isolamento

© HIOKI E.E. CORPORATION 2021

Primeiro, certifique-se de desligar o sistema (HV) alta voltagem do veículo, desconectando o plugue ou interruptor de serviço antes de realizar qualquer teste ou medição elétrica. Segundo, após realizar a medição de tensão zero e demais procedimentos de segurança, que confirmam que o veículo está totalmente desligado, pode-se prosseguir com o teste de isolamento. Terceiro, a tensão de teste aplicada durante a medição do isolamento deve ser superior à tensão da bateria do veículo. Ao medir a resistência de isolamento com o testador de isolamento HIOKI, por exemplo, use a faixa de 500 V se a bateria HV do veículo for de 400 V. Lembre-se de que a tensão de teste pode variar com base no modelo do veículo. Quarto, julgue o isolamento bom ou ruim com base no valor de resistência de isolamento especificado para o modelo do veículo pelo fabricante.

Conforme mostrado na Tabela 1; os testes são feitos tanto no conector da bateria HV (lado da bateria HV) quanto no conector do inversor (lado do inversor). O teste é realizado entre cada um dos conectores laterais do cabo HV (bateria e inversor) e o terra do chassi do veículo. Como existe um diodo do lado do inversor, é necessário trocar a polaridade, então o teste é feito duas vezes.

Tabela 1: Pontos de teste.
HIOKI E.E. CORPORATION 2021

Ponto de teste	Terminal positivo do testador de isolamento (+)	Terminal negativo do testador de isolamento (-)
Lado da bateria HV	Terminal positivo do conector (+)	Chão
	Terminal negativo do conector (-)	Chão
Lado do inversor	Terminal positivo do conector (+)	Chão
	Terminal negativo do conector (-)	Chão
	Chão	Terminal positivo do conector (+)
	Chão	Terminal negativo do conector (-)

Teste de isolamento no lado da bateria HV (figura A) e no lado do inversor (figura B).



(A)



(B)

Figura 4 – Pontos de Isolamento.
© HIOKI E.E. CORPORATION 2021

3.3 Para Medições mais Seguras e Eficientes.

A seguir, daremos uma olhada no testador de resistência de isolamento IR4059 Hioki's, incluindo suas características e porque ele é uma boa escolha para medir o isolamento BEV. Para a faixa HV (500 V ou 1000 V), o IR4059 possui um recurso de segurança que exige que o técnico desbloqueie além de escolher a tensão para evitar operações errôneas de aplicação de alta tensão em equipamentos de baixa tensão conforme a figura 5.



Figura 5 – Testador de Resistência
© HIOKI E.E. CORPORATION 2021

O cabo de teste com interruptor remoto (incluído), L9788-10, permite iniciar e parar a medição na ponta dos dedos conforme a figura 6. É equipado com um LED, que auxilia na visibilidade e nas avaliações instantâneas de aprovação/reprovação enquanto a medição está em andamento.



Figura 6 – Cabo Teste.
© HIOKI E.E. CORPORATION 2021

Com a cinta magnética Z5020 prendendo o testador de isolamento ao veículo, você pode realizar o teste de isolamento enquanto verifica a leitura ao nível dos olhos conforme a figura 7.



Figura 7 – Cinta Magnética
© HIOKI E.E. CORPORATION 2021

A instalação do Adaptador Wireless Z3210 no IR4059 permite a conexão Bluetooth®. Ao conectar o instrumento ao aplicativo móvel GENNECT Cross, você pode digitalizar e gerenciar seus dados de medição. Ao armazenar os dados e compará-los na inspeção anual, é possível tomar ações preventivas contra a deterioração do isolamento do BEV, conforme a figura 8.



Figura 8 – Comunicação
© HIOKI E.E. CORPORATION 2021

4. Resultados e Discussão dos Resultados

Os técnicos desempenham um papel crucial na realização de testes elétricos essenciais e inspeções mecânicas para manutenção de VE, notavelmente, o teste de resistência de isolamento é uma pedra angular para garantir a segurança do veículo o IR4059 brilha com recursos de segurança e fáceis de usar, agilizando as tarefas técnicas sem esforço, os veículos elétricos a baterias (do inglês, *Battery Electric Vehicles* - BEVs) têm assumido cada vez mais uma parcela maior do mercado automotivo devido a fatores como potência instantânea do sistema tradicional e a sua capacidade de substituir veículos movidos a combustíveis fósseis, a disseminação de BEVs no mercado de transportes é uma solução atraente para diminuir a emissão de gases de efeito estufa e aumentar a eficiência energética global, de acordo com o Global EV outlook 2018 (AGENCY, 2019), o mercado automobilístico mundial implantará com sucesso 117,6 milhões de BEVs nas estradas até 2030, o que contribuirá para reduzir 262 Mt de emissão de CO₂ (SHRIVASTAVA et al., 2019), no BEV, a bateria é a principal fonte de energia e, geralmente, é o componente mais caro e mais desafiador devido à sua complexidade, pois a autonomia do veículo é afetada diretamente pelo seu mau funcionamento, que na maioria das vezes, está associada a erros na estimativa do estado de carga, limitações de potência disponibilizada devido à temperatura de operação elevada e envelhecimento da bateria (CHEN; FU; MI, 2013). A modelagem de baterias se tornou um assunto amplamente estudado em diferentes áreas científicas, como consequência do aumento de aplicações dependentes de sistemas de energia em diferentes setores da sociedade, porém, apesar de ser uma excelente fonte de energia elétrica, a bateria apresenta uma série de limitações ligadas à sua composição eletroquímica complexa, efeitos internos relacionados às condições de trabalho e de operação, assim, com o objetivo de representar o comportamento da bateria de maneira precisa e não complexa, é realizada a modelagem do sistema (HU et al., 2012). Segundo BOCA et al. (2018), os modelos podem ser agrupados em três categorias principais: matemático, eletroquímico e elétrico.

O modelo matemático é capaz de prever o funcionamento da bateria a partir de um conjunto específico de parâmetros aplicados em equações obtidas experimentalmente ou aproximações estocásticas, fornecendo resultados menos precisos e viáveis apenas em certas aplicações. No modelo eletroquímico, são usadas equações

diferenciais parciais para descrever o comportamento físico-químico da bateria, resultando em uma alta precisão nos resultados, porém com elevada complexidade de solução, no modelo elétrico, é apresentado um melhor equilíbrio entre precisão e complexidade computacional requerida de modo que o modelo possa ser empregado em microprocessadores sem comprometer a precisão das estimações.

Neste estudo, a modelagem da bateria de lítio-íon foi feita com base em um subtipo do modelo elétrico conhecido como modelo de circuito equivalente de Thévenin, ele simula o comportamento da bateria a partir de elementos resistivos e capacitivos associados à tensão de circuito, conforme apresentado na Figura 9. Nela, (R_{int}) representa a resistência interna da bateria; $35 R_i$ e C_i em paralelo representam a resposta transitória da bateria; V_{oc} é a tensão de circuito aberto; V e I são a tensão de saída e a corrente do sistema, respectivamente (BRONDANI, 2015).

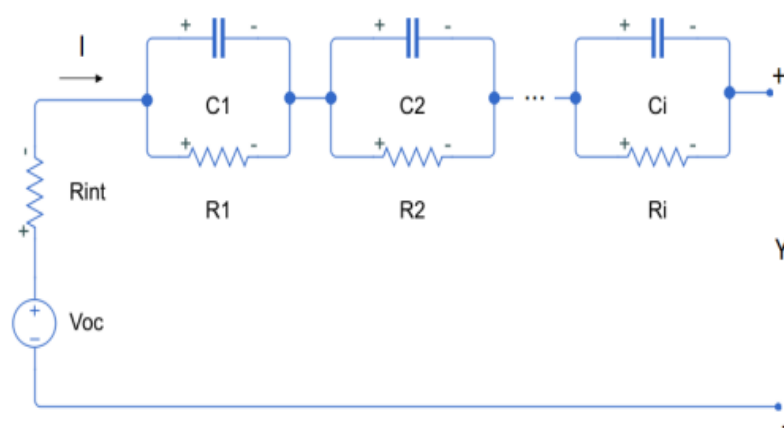


Figura 9 – Circuito Equivalente de Thévenin
Fonte: Autor (2024)

O teorema de Thévenin é um importante conceito da teoria de circuitos elétricos que permite simplificar a análise de circuitos complexos. Ele afirma que qualquer circuito linear pode ser representado por um circuito equivalente mais simples, chamado de circuito de Thévenin, composto por uma fonte de tensão em série com uma resistência. Esse teorema é amplamente utilizado na resolução de problemas práticos de engenharia, pois permite simplificar a análise de circuitos e facilita o cálculo de correntes e tensões em diferentes partes do circuito. Além disso, o teorema de Thévenin é fundamental para determinar a máxima transferência de potência de um circuito para uma carga externa. Um exemplo simples de aplicação do teorema de Thévenin seria o cálculo da corrente em um resistor de um circuito complexo. Ao utilizar o teorema de

Thévenin, é possível substituir o circuito original por um circuito equivalente mais simples, calcular a corrente atravessando o resistor e, em seguida, encontrar a corrente no circuito original. Essa abordagem simplificada economiza tempo e esforço na resolução de problemas de circuitos elétricos.

5. Conclusões

Em conclusão, é fundamental reconhecer que cada método possui suas próprias vantagens e limitações, e a escolha do método mais apropriado deve ser guiada pelas necessidades específicas da aplicação, este estudo contribui não apenas para o entendimento da performance relativa desses métodos, mas também destaca a importância de considerar fatores práticos ao implementar soluções de estimação de SoC em sistemas de armazenamento de energia, essas descobertas fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos práticos no campo da gestão de baterias, visando aprimorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de armazenamento de energia alimentados por baterias de íon de lítio, os resultados obtidos ao longo do estudo proposto, devido ao único e individualizado comportamento neurobiológico humano, concluiu-se a necessidade de realizar o desenvolvimento de um produto sob medida para cada usuário, sendo aplicável em situações em que este encontra-se em situações de risco, como, por exemplo, um motorista entrando em seu estado de sonolência, ser alertado antes mesmo de aprofundar-se nesta situação, evitando acidentes, também pode ser aplicado em situações que exigem atenção, concentração e meditação para melhoria do desempenho em uma atividade à qual o indivíduo está submetido.

6. Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>BEV</i>	<i>Battery Electrical Vehicle</i>
<i>HV</i>	<i>High Voltage</i>
<i>BMS</i>	<i>Battery Management System</i>
<i>CBMM</i>	<i>Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração</i>
<i>DoD</i>	<i>Depth of Discharge</i>
<i>ECM</i>	<i>Equivalent Circuit Model</i>
<i>EoL</i>	<i>End of Life</i>
<i>LIB</i>	<i>Lithium-ion Battery</i>
<i>Li-ion</i>	<i>Lithium-ion</i>
<i>LFP</i>	<i>Lithium-Ion Phosphate</i>
<i>LNCA</i>	<i>Lithium Nickel Cobalt Aluminum</i>
<i>Oxide LNMC</i>	<i>Lithium Nickel Manganese Cobalt</i>
<i>OxideMLP</i>	<i>Multilayer Perceptron</i>
<i>ML</i>	<i>Machine Learning</i>
<i>OCV</i>	<i>Open Circuit Voltage</i>
<i>SoC</i>	<i>State of Charge</i>
<i>SoH</i>	<i>State of Health</i>
<i>SVM</i>	<i>Support Vector Machine</i>
<i>VCU</i>	<i>Vehicle Control Unit</i>

7. Referências

- A. Foco nas baterias de lítio : Revista Pesquisa Fapesp (Domingos Zarapolli)
- B. Baterias Recarregáveis (sta-eletronica.com.br)
- C. BALAGOPAL, B.; CHOW, M.. The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium Ion batteries. In: IEEE. Industrial Informatics (INDIN), 2015 IEEE 13th International Conference on. Cambridge, 2015. P. 1302 – 1307.
- D. BALASINGAM, B.; PATTIPATI, K.. Elements of a Robust Battery-Management System: From Fast Characterization to Universality and More. IEEE Electrification Magazine, v. 6, n. 3, p. 34 – 37, 2018. ISSN 2325-5889
- E. FELIPPE J. G TERTULIANO. Universidade Federal da Paraíba Centro de Energias Alternativas e Renováveis Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Estimação do Estado de Carga em Baterias de Lítio-Íon Baseada em Filtro de Kalman Unscente.
- F. ICTOR H. O. CHAGAS. Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências Departamento de Eletrônica e Sistemas Graduação em Engenharia Eletrônica, Estimação do estado de carga em bateria de lítio com armazenamento em nuvem.