

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Guilherme Andriotti Momesso**

**Estimativa do estado de carga de baterias de íon-lítio  
com aplicação em sistemas isolados de geração  
fotovoltaica**

**São Carlos**

**2018**



**Guilherme Andriotti Momesso**

**Estimativa do estado de carga de baterias de íon-lítio  
com aplicação em sistemas isolados de geração  
fotovoltaica**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação, da Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Computação.

Orientadora: Profa. Vilma Alves de Oliveira

**São Carlos  
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

A953e           Andriotti Momesso, Guilherme  
                  Estimativa do estado de carga de baterias de  
                  íon-lítio com aplicação em sistemas isolados de geração  
                  fotovoltaica / Guilherme Andriotti Momesso; orientadora  
                  Vilma Alves de Oliveira. São Carlos, 2018.

                  Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)  
                  -- Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de  
                  Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de  
                  São Paulo, 2018.

                  1. Estado de carga. 2. Bateria de íon-lítio. 3.  
                  Contagem de Coulomb. 4. Modelo de bateria. 5. Obtenção  
                  de parâmetros. 6. Iluminação noturna. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome:** Guilherme Andriotti Momesso

**Título:** “Estimativa do estado de carga de baterias de íon-lítio com aplicação em sistemas de geração de energia solar isolados (off-grid)”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido em** 04/12/2018.

**Comissão Julgadora:**

**Resultado:**

Profa. Titular Vilma Alves de Oliveira (Orientadora)  
- SEL/EESC/USP

APROVADO

Prof. Adjunto Amilcar Flamarion Querubini  
Gonçalves  
UFSCar

APROVADO

Mestre Rafael Guedes Lang  
Doutorando - SEL/EESC/USP

APROVADO

**Coordenador do Curso Interunidades Engenharia de Computação:**

*Prof. Dr. Maximilian Luppe*

*A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão  
próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus familiares. Meus pais, Dalcio e Silvana, que por todos os meus anos de vida me deram amor incondicional e sempre me impulsionaram em direção aos meus sonhos. Ao meu irmão e minha namorada, Gustavo e Marina, que sempre estiveram presentes e me fizeram companhia nos momentos de alegria e tristeza em minha vivência. Aos demais familiares, tios e tias, primos e primas, e meus avós, muito obrigado pela contribuição valiosa.

Agradeço aos meus professores pelo conhecimento contribuído para minha formação. Em especial a Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira, pela orientação e dedicação à realização deste trabalho. A todos do LIO, sobretudo a Profa. Dra. Liliane Ventura, por todo o conhecimento adquirido nesses anos de trabalho.

Aos amigos que fiz durante a minha jornada em São Carlos, meu muito obrigado por junto comigo tornar esta etapa da vida agradável e divertida, com certeza os levarei para a vida toda. Aos membros do Warthog Robotics e da ADA, agradeço por juntos compartilhamos conhecimento não apenas técnico, e de uma forma sempre leve e descontraída.

Agradeço também a esta universidade, administração e funcionários, pela oportunidade de completar minha graduação em um ambiente tão amigável.

*“A mind that is stretched by a new experience can  
never go back to its old dimensions.”*

*Oliver Wendell Holmes*



## RESUMO

MOMESSO, G. A. **Estimativa do estado de carga de baterias de íon-lítio com aplicação em sistemas isolados de geração fotovoltaica.** 2018. 48p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Este trabalho aborda o problema da estimativa do estado de carga de baterias recarregáveis. Foram apresentados os princípios de funcionamento das baterias de íon-lítio e suas vantagens sobre outras tecnologias. A partir da escolha de uma bateria, um modelo baseado em circuito equivalente foi proposto e seus parâmetros foram estimados. Os ensaios necessários para obtenção desses parâmetros foram descritos e seus resultados discutidos. Com esses parâmetros, simulações foram realizadas para verificar a proximidade dos valores simulados aos experimentais. Em seguida avaliou-se a viabilidade da obtenção de um modelo baseado no circuito equivalente de Thévenin, com a possibilidade de obtenção dos parâmetros com o circuito em operação. Os principais métodos usados na estimativa do estado de carga foram apresentados e o método da contagem de Coulomb foi utilizado em uma aplicação envolvendo um sistema de carregamento de baterias com painel fotovoltaico que eram utilizadas como fonte de energia para um sistema de iluminação noturna. Com o estado de carga avaliado, foi possível ajustar a corrente entregue para o circuito de iluminação de modo a mantê-lo operando durante todo o período da noite com intensidade constante.

**Palavras-chave:** Estado de carga. Bateria de íon-lítio. Contagem de Coulomb. Modelo de bateria. Obtenção de parâmetros. Iluminação noturna.

## ABSTRACT

MOMESSO, G. A. **State of charge estimation of Li-ion batteries with application in isolated photovoltaic generation systems** . 2018. 48p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

This paper deals with the rechargeable batteries state of charge estimation. There were stated the main concepts of the lithium-ion battery operation and its advantages over other technologies. Starting with a battery adoption, a model based on an equivalent circuit was proposed and its parameters were estimated. The experiments used to obtain the parameters were described and the results were discussed. Simulations were conducted to check the simulated data against the experimental data. Next, the viability to obtain a Thévenin equivalent circuit was evaluated, also the possibility of obtaining the parameters while the circuit is at operation. The main methods used in the charge state estimation were studied and the Coulomb-counting method was used in an application involving a battery charging system containing photovoltaic panels used as power source for a night illumination systems. Considering the state of charge evaluated, it was possible to adjust the current delivered to the illumination circuit, in a way to make it operational and constant all night long.

**Keywords:** State of charge. Lithium-ion battery. Coulomb-counting. Battery model. Parameters estimation. Nocturnal illumination.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura interna de uma célula de íon lítio. . . . .	18
Figura 4.1 – Modelo para baterias de lítio considerando uma associação RC paralelo. . . . .	25
Figura 4.2 – Circuito utilizado para realizar medidas de corrente e tensão nos terminais da bateria com uma carga conectada a sua saída. . . . .	28
Figura 4.3 – Tensão e corrente nos terminais da bateria 1 (B1) e carga armazenada durante um ciclo de carregamento completo. . . . .	28
Figura 4.4 – Tensão e corrente nos terminais da bateria 2 (B2) e carga armazenada durante um ciclo de carregamento completo. . . . .	29
Figura 4.5 – Tensão e corrente nos terminais da bateria 1 (B1) e carga restante durante um ciclo de descarga completo. . . . .	29
Figura 4.6 – Tensão e corrente nos terminais da bateria 2 (B2) e carga restante durante um ciclo de descarga completo. . . . .	29
Figura 4.7 – Circuito usado para obtenção dos parâmetros internos da bateria. . . . .	31
Figura 4.8 – Variações de carga aplicados na bateria 1 (B1) para obter os parâmetros do modelo. . . . .	32
Figura 4.9 – Variações de carga aplicados na bateria 2 (B2) para obter os parâmetros do modelo. . . . .	32
Figura 4.10–Detalhe da influência da resistência interna na tensão dos terminais da bateria. . . . .	33
Figura 4.11–Valores de tensão de circuito aberto obtidos a partir dos dados dos ensaios com pulsos de descarga. . . . .	33
Figura 4.12–Valores de resistência interna obtidos a partir dos dados dos ensaios com pulsos de descarga. . . . .	33
Figura 4.13–Parâmetros estimados para as baterias. . . . .	35
Figura 4.14–Conversor abaixador de tensão do tipo <i>buck</i> . . . . .	36
Figura 4.15–Diagrama de blocos do controlador PI. . . . .	37
Figura 4.16–Variações na carga para o cálculo do equivalente de Thévenin. . . . .	37
Figura 4.17–Tensão e resistência de Thévenin obtidos para o SoC variando de 5 % a 100 %. . . . .	37
Figura 4.18–Variação de carga conectada à bateria para o cálculo do equivalente de Thévenin. . . . .	38
Figura 4.19–Tensão e impedância de Thévenin obtidos para o SoC variando de 0% a 100%. . . . .	38
Figura 4.20–Resultados da simulação para a bateria 1 com relação ao ensaio realizado durante a obtenção dos parâmetros. . . . .	39

Figura 4.21–Resultados da simulação para a bateria 2 com relação ao ensaio realizado durante a obtenção dos parâmetros. . . . .	39
Figura 4.22–Resultados da simulação para a bateria 1 com relação ao ensaio realizado para a obtenção do equivalente de Thévenin. . . . .	40
Figura 5.1 – Arquitetura do sistema de iluminação noturna alimentado por bateria de íon lítio. . . . .	41
Figura 5.2 – Perfil de carga e descarga entre 24 e 25 de novembro de 2018. . . . .	43
Figura 5.3 – Resultados da simulação para a bateria 2 com relação aos dados coletados pelo sistema de iluminação noturna. . . . .	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais materiais usados nos cátodos, com sua tensão nominal em aplicações com ânodos de grafite (THACKERAY; WOLVERTON; ISA-ACS, 2012). . . . .	18
Tabela 4.1 – Especificações da bateria de íon lítio 18650, declaradas pelo fornecedor.	26
Tabela 4.2 – Capacidade nominal calculada após o processamento dos dados. . . . .	28
Tabela 4.3 – Tensões de circuito aberto para as baterias com SoC de 100%. . . . .	30
Tabela 4.4 – Capacidade observada durante a obtenção dos parâmetros. . . . .	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SoC	Estado de carga (iniciais do inglês, <i>state of charge</i> )
MCEE	Modelo de circuito elétrico equivalente
LCO	<i>Lithium cobalt oxide</i>
Li-Ion	Íon-lítio
Li-Po	Polímero de lítio
CC-CV	Corrente constante e tensão constante

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivos	16
1.2	Estrutura da monografia	16
<b>2</b>	<b>BATERIAS</b>	<b>17</b>
2.1	Íon-lítio	17
2.2	Chumbo ácido	19
2.3	Estado de carga	19
<b>3</b>	<b>MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DO ESTADO DE CARGA</b>	<b>21</b>
3.1	Tensão de circuito aberto	21
3.2	Contagem de Coulomb	21
3.3	Filtro de Kalman estendido	22
3.3.1	Filtro de Kalman <i>unscented</i>	23
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DA BATERIA</b>	<b>24</b>
4.1	Modelos	24
4.1.1	Modelo adotado	24
4.2	Obtenção dos parâmetros da bateria	26
4.2.1	Capacidade nominal e curva de carga e descarga	27
4.2.2	Tensão de circuito aberto e resistência interna	30
4.2.3	Associação RC paralelo	34
4.3	Equivalente de Thévenin	35
4.3.1	Conversor CC-CC	36
4.4	Resultados das simulações usando um modelo com uma associação RC paralelo	38
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE ILUMINAÇÃO NOTURNA COM PAINEL FOTO-VOLTAICO</b>	<b>41</b>
5.1	Arquitetura	41
5.1.1	Implementação	42
5.1.2	Sistema embarcado	42
5.2	Contagem de Coulomb	43
5.2.1	Comparativo entre dados experimentais e simulados	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>45</b>
6.1	Trabalhos futuros	46

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>
--------------------------	-----------



## 1 INTRODUÇÃO

O armazenamento de energia elétrica em baterias é a principal forma de armazenar energia na atualidade e está sendo cada vez mais estudado. Baterias são utilizadas em diversas áreas como a de geração de energia solar, em aplicações de robótica móvel e sistemas automotivos, e também em dispositivos eletrônicos portáteis (FURLAN, 2008).

Dentre as várias tecnologias de baterias existentes é necessário avaliar qual a mais adequada para cada aplicação, não existindo atualmente uma solução genérica que forneça bons resultados independente de contexto. Em aplicações envolvendo carros elétricos e dispositivos portáteis, as baterias de íon-lítio se mostram como a melhor alternativa (CHEN; SHEN; VO; CAO; KAPOOR, 2012) e com o grande crescimento que vem ocorrendo nesses cenários, esse tipo de bateria começa a disputar espaço com outras tecnologias como o chumbo ácido, já consolidada em outras aplicações.

As baterias de chumbo ácido, quando comparadas com as de íon-lítio, possuem comportamento praticamente linear em sua relação entre a tensão de circuito aberto e o estado de carga equivalente (KIM et al., 2015). Já as baterias de íon-lítio, apresentam comportamento extremamente não linear nessa relação e com a variação na temperatura essa relação sofre deslocamentos (LI et al., 2014). Esse é um dos motivos pela grande quantidade de pesquisas nessa área, em busca de métodos que descrevam essas baterias e sejam viáveis para ser aplicados em sistemas embarcados (RONG; PEDRAM, 2006).

Esse trabalho trata da implementação de um sistema embarcado que realiza a medição do estado de carga de uma bateria que é carregada durante o dia através de painéis solares fotovoltaicos. Com essa medida temos a quantidade de energia que está armazenada na bateria. Buscando uma aplicação para a estimativa de carga obtida nesse trabalho, será realizado o controle da potência fornecida para um sistema de iluminação através de um conversor de corrente contínua. Com isso, buscamos manter um ambiente iluminado durante toda a noite, mesmo que com uma intensidade menor, mas com garantia de que não faltará iluminação devido ao esgotamento da energia armazenada na bateria.

Os métodos e resultados desse trabalho oferecem uma percepção sobre o funcionamento de baterias recarregáveis. A utilização de um modelo para baterias de íon lítio baseado em um circuito equivalente, os meios de obter os parâmetros utilizados por esse modelo e a abordagem dos principais métodos utilizados atualmente para a estimativa do estado de carga poderão ser empregados em outros projetos que utilizem baterias e precisem estimar a carga disponível para uso em um dado instante. Além disso, a arquitetura utilizada pelo sistema embarcado de iluminação poderá ser adaptada para outros sistemas que utilizem geração fotovoltaica com armazenamento de energia em baterias.

## 1.1 Objetivos

Descrever o princípio de funcionamento dos principais tipos de baterias recarregáveis, a fim de fornecer uma perspectiva sobre o problema abordado e suas principais dificuldades. Dentre os tipos descritos, escolher uma bateria de íon lítio para a realização deste trabalho.

Existem vários métodos que podem ser utilizados para a estimativa do estado de carga. Os principais serão abordados, com a explicação de seus princípios de funcionamento e também com a apresentação suas vantagens e desvantagens.

A partir da bateria escolhida, será realizada a sua modelagem e obtenção de parâmetros, com base nos dados coletados em vários ensaios. As etapas desses ensaios serão apresentadas e discutidas, visando sua possível utilização em trabalhos futuros. O modelo obtido é requerido por alguns dos métodos apresentados e sua resposta com os parâmetros obtidos também será discutida.

Por fim, será desenvolvido um sistema embarcado que realiza a estimação do estado de carga (SoC) de baterias que são carregadas durante o dia através da energia produzida com painéis fotovoltaicos e descarregada durante a noite ao servir de fonte de energia para um sistema de iluminação noturna.

## 1.2 Estrutura da monografia

O Capítulo 2 explica o funcionamento de baterias de íon-lítio e chumbo ácido, comentando seus problemas e vantagens. No Capítulo 3 são apresentados os principais métodos de estimação do estado de carga de baterias. O Capítulo 4 propõe o uso de um modelo de circuito elétrico equivalente para a bateria de íon-lítio e realiza a obtenção de seus parâmetros. Os resultados obtidos nesse capítulo são verificados através de simulações. Por fim o Capítulo 5 descreve uma possível aplicação do método da contagem de Coulomb para a estimação do estado de carga.

## 2 BATERIAS

As baterias de íon-lítio (Li-ion) dominam o mercado de dispositivos eletrônicos pessoais, principalmente por conta de suas propriedades que são vantajosas para seu uso em dispositivos portáteis, onde normalmente o consumo elétrico é baixo. Com os mais recentes avanços, essa tecnologia está começando a ser empregada em sistemas de alta potência, como no caso do armazenamento de energia elétrica em sistemas de distribuição de energia e também como fonte de energia em veículos elétricos (CHEN; SHEN; VO; CAO; KAPOOR, 2012).

Um dos maiores desafios para a consolidação do uso de baterias como fonte primária de energia consiste na correta estimativa da carga real que está armazenada. Essa estimativa é complexa e propensa a erros devido aos diversos fatores físico-químicos que podem alterar as propriedades dessas baterias e são difíceis de ser analisados devido ao baixo conhecimento atual sobre esses fatores (ZHANG; PENG; NING; MU; SUN, 2017).

A estimativa do estado de carga é necessária para evitar problemas como descarga ou sobrecarga além dos limites de segurança e para a correta operação do sistema com base na carga remanescente, evitando falta de energia em estados críticos ou o desligamento prematuro do sistema com sobra de carga na bateria. De qualquer forma, qualquer estimativa incorreta da carga de uma bateria pode levar ao seu deterioramento acelerado ou a uma situação que represente perigo para a operação do sistema (SCROSATI; CROCE; PANERO, 2001).

### 2.1 Íon-lítio

Existem vários tipos diferentes de baterias de íon-lítio, sendo o mais comum a de *Lithium Cobalt Oxide* (LCO), amplamente empregada em aparelhos celular e notebooks. Elas são constituídas geralmente por ânodos de carbono, tipicamente grafite, cátodos de óxido metálico, com os principais tipos listados na Tabela 2.1, um eletrólito líquido e uma alta concentração de lítio no ânodo. Durante o processo eletroquímico que ocorre na descarga, átomos de lítio se "desprendem" do ânodo e são movidos para a solução do eletrólito na forma de íons de lítio, até que ocorra sua reação com o cátodo, onde o lítio volta para seu estado sólido (MEKONNEN; SUNDARARAJAN; SARWAT, 2016).

Tabela 2.1: Principais materiais usados nos cátodos, com sua tensão nominal em aplicações com ânodos de grafite (THACKERAY; WOLVERTON; ISAACS, 2012).

Óxido metálico	Fórmula molecular	Tensão nominal
Lithium Cobalt Oxide	$\text{LiCoO}_2$	3,7 V
Lithium Manganese Oxide	$\text{LiMg}_2\text{O}_4$	4,0 V
Lithium Iron Phosphate	$\text{LiFePO}_4$	3,4 V

Existem também eletrólitos a base de polímeros sólidos, usado nas baterias de polímero de lítio (Li-Po), que possibilitam o desenvolvimento de baterias mais finas, com certo grau de flexibilidade e mais seguras. Algumas desvantagens dos eletrólitos de polímero sobre os eletrólitos líquidos são relacionadas a menor disponibilidade de diferentes tipos de eletrólitos e a taxa de condutividade de íons ser menor durante sua operação em temperatura ambiente, fatores que causam redução de densidade energética e custo de produção ligeiramente maior (SCROSATI; CROCE; PANERO, 2001).

A Figura 2.1 exemplifica a estrutura de uma célula de íon lítio com ânodo de grafite e cátodo de Lithium Cobalt Oxide (LCO) com estrutura em camadas. O eletrólito permite a difusão dos íons de lítio e a membrana de separação possui estrutura porosa que isola eletricamente os eletrodos, sendo permeável por íons de lítio e não por elétrons (SAIDANI; HUTTER; SCURTU; BRAUNWARTH; BURGHARTZ, 2017). Durante o processo de carga e descarga, ocorrem reações de oxirredução, associadas a corrente elétrica presente na bateria durante durante esses processos.

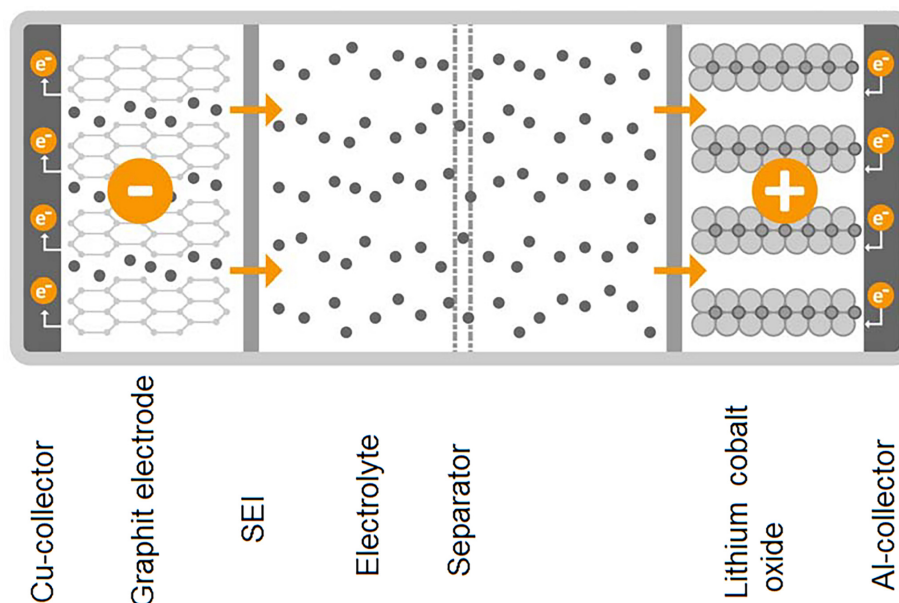
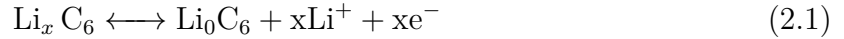


Figura 2.1: Estrutura interna de uma célula de íon lítio.

Fonte: (SAIDANI; HUTTER; SCURTU; BRAUNWARTH; BURGHARTZ, 2017)

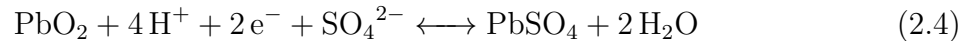
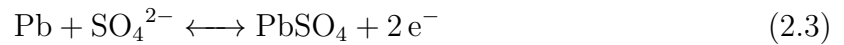
As reações químicas no ânodo de grafite e no cátodo de LCO são descritas por:



Essa foi a tecnologia de bateria utilizada neste trabalho devido a sua ampla disponibilidade no mercado.

## 2.2 Chumbo ácido

A muito tempo as baterias de chumbo ácido dominam o mercado, superando outras tecnologias na quantidade total produzida, e se consolidou em algumas aplicações, sendo o principal meio de armazenamento de energia utilizado em sistemas de partidas de automóveis e em sistemas de fornecimento ininterrupto de energia (MAY; DAVIDSON; MONAHOV, 2018). Cada célula fornece cerca de 2 volts, possuindo ânodo de dióxido de chumbo, cátodo de chumbo poroso e solução eletrolítica de ácido sulfúrico. Durante a carga e descarga ocorrem as reações químicas:



A baixa densidade energética (cerca de 4 vezes menor, quando comparado com baterias de íon lítio) é uma de suas características indesejáveis (BASTOS, 2013). Outros problemas, como a rápida degradação causada pela sulfatação quando utilizada em ciclos profundos de descarga, a corrosão e crescimento não uniforme do eletrodo positivo durante o carregamento e a baixa taxa de descarga contínua, fazem com que sua aplicação se torne inviável ou ineficiente.

Apesar desses problemas, essas baterias possuem altíssima taxa de descarga de pico, baixo custo de produção e mesmo com a presença de metais pesados, o processo de reciclagem é muito dominado em todo o mundo (MAY; DAVIDSON; MONAHOV, 2018).

## 2.3 Estado de carga

O estado de carga de uma bateria representa a relação entre a capacidade disponível e a capacidade nominal e é dada por

$$\text{SOC}(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}. \quad (2.5)$$

Existem diversas abordagens para a obtenção do estado de carga, como os métodos de medida direta, onde parâmetros da bateria como tensão de terminal e impedância são medidos (CHANG, 2013).

A estimativa do estado de carga é muito empregada atualmente em praticamente qualquer dispositivo que utilize baterias. Normalmente para a realização dessa estimativa, a bateria é modelada através de circuitos equivalentes que a descrevem de forma simples ou através de modelos eletroquímicos que são mais complexos, mas oferecem maior detalhamento (WANG; FANG; ZHOU; WADA, 2017).

### 3 MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DO ESTADO DE CARGA

A seguir estão descritos métodos que não precisam de modelo da bateria, que são mais simples de implementar e podem ser eficazes em certas aplicações, mas podem facilmente fornecer resultados imprecisos. Também, são descritos métodos baseados em Filtro de Kalman e Filtro de Partículas, que fornecem resultados melhores, mas exigem o ajuste de parâmetros que nem sempre são triviais.

#### 3.1 Tensão de circuito aberto

A tensão de circuito aberto pode ser obtida quando a bateria está sem nenhuma carga conectada aos seus terminais. Porém, para que o valor lido possa ser utilizado para uma boa estimação da carga da bateria, é necessário aguardar um período de tempo no qual a bateria estabiliza sua tensão. Esse tempo costuma ser muito longo para obter uma boa precisão o que torna esse método inviável para muitas aplicações onde a remoção da carga não é possível ou só pode ocorrer durante um intervalo de tempo muito curto.

As baterias de íon lítio costumam ter um comportamento muito linear e praticamente constante em seu valor de tensão de circuito aberto para alguns trechos de estado de carga, o que acaba tornando esse método impreciso, dado que qualquer variação na ordem de milivolts representa uma grande variação no estado de carga.

Esse método é válido para baterias novas, desde que as condições que esta se encontra sejam próximas das condições usadas durante o mapeamento das tensões de circuito aberto e seus respectivos estados de carga. Entretanto, com o passar do tempo, as baterias passam a sofrer com efeitos de envelhecimento que passam despercebidos por esse método (LAI; ZHENG; SUN, 2018). Esses efeitos fazem com que a capacidade da bateria seja reduzida gradativamente, enquanto seus valores de tensão de circuito aberto permanecem relativamente constantes, tornando esse método inviável para uma boa estimativa.

Outro problema se deve ao fato da curva de tensão para baterias de íon lítio não ser linear, como no caso das baterias de chumbo ácido. Isso gera dificuldades durante a conversão da tensão lida para um valor de estado de carga.

#### 3.2 Contagem de Coulomb

O método de contagem de Coulomb exige a leitura constante da corrente de carga e descarga, a qual é integrada no tempo, fornecendo a carga total consumida ou carregada em amperes-hora (Ah). A principal desvantagem desse método é o acúmulo de erro causado pela integração das leituras que possuem ruído e são ligeiramente diferentes do valor real,

devido aos erros dos circuitos que realizam a conversão da corrente para um valor digital que possa ser avaliado. Além disso, é necessário conhecer o estado de carga inicial da bateria, antes do início da contagem das cargas, pois sem isso não é possível indicar o estado de carga para qualquer momento (PILLER; PERRIN; JOSSEN, 2001).

Cada ampere-hora corresponde a 3600 Coulombs (C) e cada Coulomb equivale a carga transportada por uma corrente elétrica de 1 ampere (A) durante 1 segundo. Apesar do método "contar" os Coulombs que entram e saem da bateria, a unidade em amperes-hora é a mais utilizada para indicar a carga total de baterias comerciais.

O cálculo do estado de carga pelo método da contagem de Coulomb, com  $SOC_0$  indicando o estado de carga inicial e  $I_{bat}$  a corrente da bateria pode ser feito a partir de:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_0^t I_{bat} dt}{Q_n} \quad (3.1)$$

Esse método contabiliza as cargas que deixaram ou retornaram para a bateria e portanto pode fornecer boas medidas desde que a bateria permaneça em condições de operação conhecidas e seu valor de capacidade nominal seja recalculado para corrigir efeitos de envelhecimento (BACCOUCHE; JEMMALI; MLAYAH; MANAI; AMARA, 2018). No caso de grandes variações da temperatura de operação e dependendo da corrente instantânea, o método da contagem de Coulomb deixa de fornecer boas estimativas para o estado de carga.

### 3.3 Filtro de Kalman estendido

Como o comportamento da bateria corresponde a um sistema estocástico não linear, a utilização de um filtro de Kalman estendido para a estimação do estado de carga passa a ser um dos métodos mais populares dentre os mais sofisticados (WANG; FANG; ZHOU; WADA, 2017).

O filtro de Kalman estendido é uma adaptação do filtro de Kalman para a avaliação de sistemas não lineares. Considere as duas equações abaixo que descrevem o estado de um sistema:

$$x_{k+1} = f(x_k) + w_k \quad (3.2)$$

$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (3.3)$$

em que  $x$  corresponde ao estado e  $y$  a saída (medida) do sistema.  $f$  e  $h$  são os modelos não lineares utilizados para prever o próximo estado estimado a partir do estado anteriormente estimado e prever a medida estimada a partir do estado estimado, respectivamente.  $w$  e  $v$  correspondem as componentes de ruído das medidas, onde são assumidamente distribuições Gaussianas com média zero.



O filtro de Kalman estendido permite a estimação do estado, chamado de  $\hat{x}$ , e da saída, chamada de  $\hat{y}$ . O estado a ser estimado depende do último estado estimado e do último estado observado. O processo de estimação é dividido em duas etapas, a predição e a atualização. A predição é dada por:

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}) \quad (3.4)$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1}P_{k-1|k-1}F_{k-1}^T + Q \quad (3.5)$$

$$F_{k-1} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1|k-1}} \quad (3.6)$$

em que  $P_{k|k-1}$  é a covariância que mede a incerteza do estado  $\hat{x}_{k|k-1}$  previsto. Esta etapa do algoritmo realiza a predição do estado e da covariância, dependendo apenas de parâmetros anteriormente estimados. A etapa seguinte, chamada de atualização, depende de uma nova medida (ou observação) da variável de saída  $y_k$ .

$$K_k = P_{k|k-1}H_k^T(H_kP_{k|k-1}H_k^T + R)^{-1} \quad (3.7)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - h(\hat{x}_{k|k-1})) \quad (3.8)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_kH_kP_{k|k-1} \quad (3.9)$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k|k-1}} \quad (3.10)$$

em que  $H_k$  é a matriz de linearização de  $h(x_k)$  que possibilita a avaliação de sistemas não lineares,  $K_k$  é chamado de ganho de Kalman.

### 3.3.1 Filtro de Kalman *unscented*

Apesar do filtro de Kalman estendido conseguir avaliar sistemas não lineares, quando as não-linearidades apresentam alto grau de complexidade ou não são diferenciáveis, o filtro pode deixar de convergir para um valor e apresentar erros de estimativa muito altos. Além disso, em sistemas de alta potência, o filtro de Kalman estendido passa a apresentar erros devido as linearizações realizadas durante as etapas de predição e atualização.

O filtro de Kalman *unscented* surge como uma solução para este tipo de sistemas. Nesse tipo de filtro, a linearização não é mais necessária e portanto sistemas com alto grau de não-linearidade podem ser avaliados com boa precisão (SANTHANAGOPALAN; WHITE, 2009).

## 4 MODELAGEM DA BATERIA

Diversos modelos para baterias estão disponíveis na literatura (CHEN; RINCON-MORA, 2006; JACKEY et al., 2013, 2013; DOMENICO; STEFANOPOULOU; FIENGO, 2010). Como escolheu-se trabalhar com uma bateria de íon lítio, os modelos abordados abaixo são voltados para esse tipo de bateria.

### 4.1 Modelos

Os principais tipos de modelos utilizados para baterias de lítio-íon são os eletroquímicos e os de circuito elétrico equivalente (XIONG; HE; GUO; DING, 2011). Os eletroquímicos são muito precisos pois descrevem os processos que ocorrem dentro da bateria, porém sua grande quantidade de parâmetros, que são de difícil obtenção, e a utilização de equações diferenciais parciais tornam esse tipo de modelo muito caro em termos computacionais (PÓZNA; MAGYAR; HANGOS, 2017). Por outro lado, os modelos de circuito elétrico equivalente (MCEE) descrevem o comportamento das baterias através da associação de componentes elétricos, sendo muito mais intuitivos, e possuem poucos parâmetros para serem ajustados, se mostrando uma excelente alternativa para a alta complexidade do eletroquímico (HU; LI; PENG, 2012).

De certa forma, a modelagem eletroquímica é aplicada apenas em situações onde é desejado conhecer e avaliar os processos físicos, como ocorre no estágio de desenvolvimento de novas baterias, enquanto que os MCEE são aplicáveis em sistemas embarcados com a finalidade de estimar o estado de carga ou prever o desempenho da bateria.

O modelo mais referenciado na literatura para modelar baterias baseadas em lítio é baseado em uma fonte de tensão variável que mapeia a tensão de circuito aberto (OCV) para diferentes valores de estado de carga, uma resistência em série que representa a resistência interna e dos contatos da bateria, uma resistência parasita que representa o efeito da auto descarga e uma série de associações RC-paralelo que modelam os efeitos de relaxação e polarização. Diferente do que ocorria com tecnologias que precederam a das baterias de lítio, a taxa de auto descarga é muito baixa e portanto costuma-se desconsiderar a resistência parasita sem grandes implicações, principalmente quando o sistema não passa por longos períodos de inatividade (JACKEY et al., 2013).

#### 4.1.1 Modelo adotado

Baseado no comparativo de doze MCEE, realizado em Hu, Li e Peng (2012), e também na proposta de Chen e Rincon-Mora (2006), o modelo da Figura 4.1 foi implementado em *Simscape* para ser utilizado em simulações com *Simulink*. Nele podemos

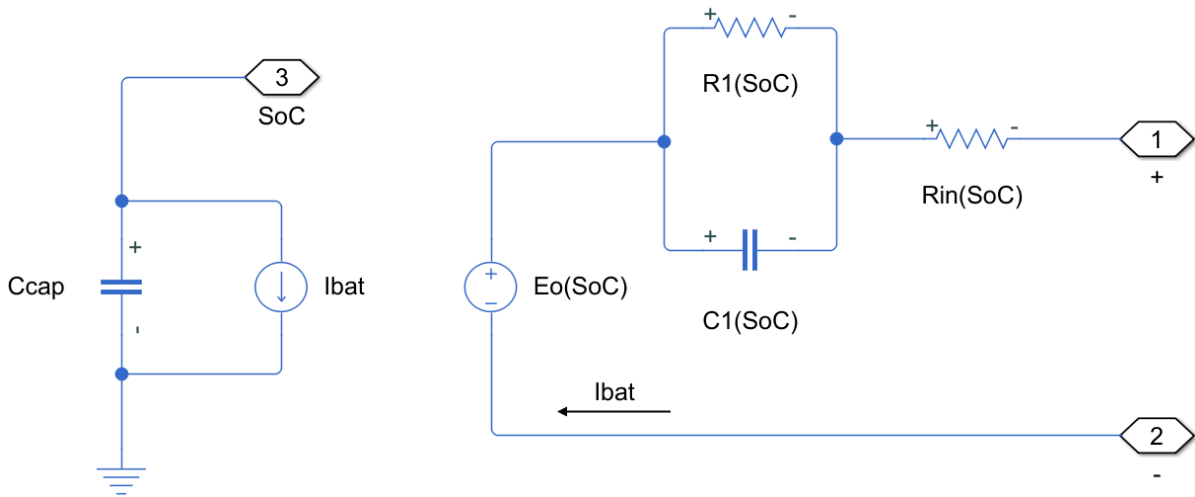


Figura 4.1: Modelo para baterias de lítio considerando uma associação RC paralelo.

observar à esquerda, a modelagem da carga da bateria através do capacitor  $C_{cap}$  que possui capacitância equivalente a capacidade nominal da bateria e tensão que representa o estado de carga variando de 0 a 1 volt, com 1V indicando uma carga de 100% e 0V indicando carga de 0%. À direita, observa-se a fonte de tensão ( $E_o$ ) e a resistência interna ( $R_{in}$ ), dependentes do valor do SoC, e uma associação RC paralelo que descreve os efeitos de polarização e relaxação. Os valores de resistência e capacitância da associação RC também dependem do SoC. A corrente  $I_{bat}$  que passa pelos terminais da bateria carrega ou descarrega o capacitor  $C_{cap}$ .

Ainda é possível modelar o efeito da temperatura e do envelhecimento da célula como segue:

$$C_{cap} = 3600C_{nom}f_{env}(ciclo)f_{temp}(T) \quad (4.1)$$

em que  $C_{nom}$  indica a capacidade nominal (em Ah),  $f_{env}$  uma função do efeito de envelhecimento da célula para um dado ciclo e  $f_{temp}$  a função que descreve o efeito da temperatura sobre a carga. A fim de simplificar e viabilizar a obtenção dos parâmetros do modelo, os efeitos de envelhecimento e temperatura foram desconsiderados (CHEN; RINCON-MORA, 2006).

Como os experimentos a serem realizados envolvem baixas potências, a bateria permanece em temperatura ambiente e não são necessários muitos ciclos de carga e descarga. Espera-se que esses efeitos sejam pequenos, e portanto não afetem significativamente a capacidade da célula.

O valor do estado de carga (SoC) do modelo é dado pela relação:

$$SoC = \frac{Q(t)}{C_{cap}} = SoC_0 - \frac{1}{C_{cap}} \int_0^t I_{bat} dt \quad (4.2)$$

## 4.2 Obtenção dos parâmetros da bateria

A obtenção dos parâmetros do modelo é possível através da elaboração de *lookup tables*, que descrevem o comportamento da bateria para vários SoC e diferentes condições de operação. Para isso, normalmente utiliza-se de variações na corrente em forma de pulsos, os quais devem possuir duração suficiente para permitir a avaliação da curva na queda de tensão que ocorre durante o consumo de carga (polarização), e além disso um novo pulso só deve ser aplicado após o nível de tensão atingir regime permanente após o período de relaxação (JACKEY et al., 2013).

Um problema desse procedimento é que tipicamente o tempo necessário para atingir regime permanente é da ordem de minutos e outros parâmetros como a temperatura da bateria podem afetar as aferições. Por isso deve-se tomar cuidado com as condições em que o sistema estará submetido durante a análise.

Para a realização dos experimentos duas baterias de íon-lítio (referidas no texto como B1 e B2), de mesmo modelo e lote, foram adquiridas. Essas baterias escolhidas são do tipo óxido de cobalto, muito populares atualmente, sendo amplamente empregadas em eletroeletrônicos como bancos de baterias. Suas especificações técnicas podem ser verificadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificações da bateria de íon lítio 18650, declaradas pelo fornecedor.

Parâmetro	Especificação	Unidade
Capacidade nominal	2600	mAh
Tensão nominal	3,7	V
Tensão de corte ( <i>cut-off</i> )	3,0	V
Tensão máxima de carga	4,2	V
Corrente de carregamento recomendada	0,5	C
Corrente máxima de descarregamento (contínua)	1,5	C
Resistência interna	$\leq 180$	$m\Omega$

A capacidade nominal define a quantidade de cargas elétricas que a bateria pode armazenar e é tipicamente indicada com a unidade de *mAh*. Isso significa que, para a bateria especificada na tabela acima, por exemplo, é possível alimentar um circuito qualquer com uma corrente constante de 2,6A durante uma hora. A tensão nominal é definida pelos materiais usados nos eletrodos do cátodo e ânodo da bateria e normalmente indica a tensão de circuito aberto para a situação em que a bateria se encontra com 50% de carga. As tensões de corte e de carga máxima são definidas pelo fabricante e indicam a faixa de operação segura da bateria, evitando seu envelhecimento precoce ou super

aquecimento, e são normalmente associados ao SoC de 0% e 100%, respectivamente. Assim como os limites de tensão, o fabricante também especifica o limite de corrente na carga e descarga, sendo esse dado tipicamente fornecido com a unidade de  $C$ , onde  $1C$  equivale ao valor da capacidade nominal, ou seja, para uma taxa de carregamento de  $0,5C$ , devemos fornecer  $1300mA$  durante o estágio de carregamento em corrente constante. Por fim, temos a resistência interna que representa a eficiência da bateria em questão, pois quanto menor esse valor, menores são as perdas internas e maior é a estabilidade térmica, devido a menor geração de calor no interior da célula.

As baterias utilizadas são genéricas e os parâmetros declarados pelo fornecedor nem sempre refletem a realidade. Dessa forma, antes de iniciar a obtenção dos parâmetros do modelo proposto, uma série de testes envolvendo a carga e descarga das duas baterias foram realizados, buscando a confirmação dos parâmetros técnicos. Essa abordagem foi tomada para evitar a tomada de conclusões equivocadas durante os experimentos e também para mostrar que é simples obter esses dados das baterias através do método de contagem de Coulomb, permitindo a avaliação até mesmo de seu estado de "saúde" (do inglês, *State of Health*) atual, que define o seu desgaste.

Durante a realização dos ensaios para obtenção dos parâmetros, os dados dos sensores foram coletados com uma taxa de aproximadamente 8 amostras por segundo e posteriormente analisados com o método de contagem de Coulomb para a estimativa do estado de carga. A integração discreta foi realizada pelo método de contagem de Coulomb

$$C_k = C_{k-1} - (T_k - T_{k-1}) \frac{(I_k + I_{k-1})}{2} \quad (4.3)$$

em que  $T_k$  é o tempo em que ocorreu a amostra  $k$ , em segundos,  $I_k$  é a corrente medida em amperes e  $C_k$  é a capacidade em Coulomb.

#### 4.2.1 Capacidade nominal e curva de carga e descarga

Para obter a capacidade nominal, as baterias passaram por ciclos de carga e descarga completos, considerando a tensão máxima de carga de 4,2 volts e a tensão mínima de descarga de 3,0 volts. Os valores de corrente e tensão foram medidos nos terminais da bateria através de um conversor analógico-digital ADS1115 e armazenados no sistema de arquivos de uma placa de desenvolvimento *Beagle Bone Green*. O esquema de ligação pode ser visto na Figura 4.2.

Como o conversor realiza leituras de valores de tensão, a conversão para corrente é descrita por:

$$I_{bat} = \frac{V_{bat} - V_{isen}}{0,1} \quad (4.4)$$

Com esses dados as curvas de carga e descarga das Figuras 4.3-4.6 foram traçadas e os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 4.2. Como o método da contagem de Coulomb integra a corrente que entra e sai da bateria, é possível obter sua capacidade

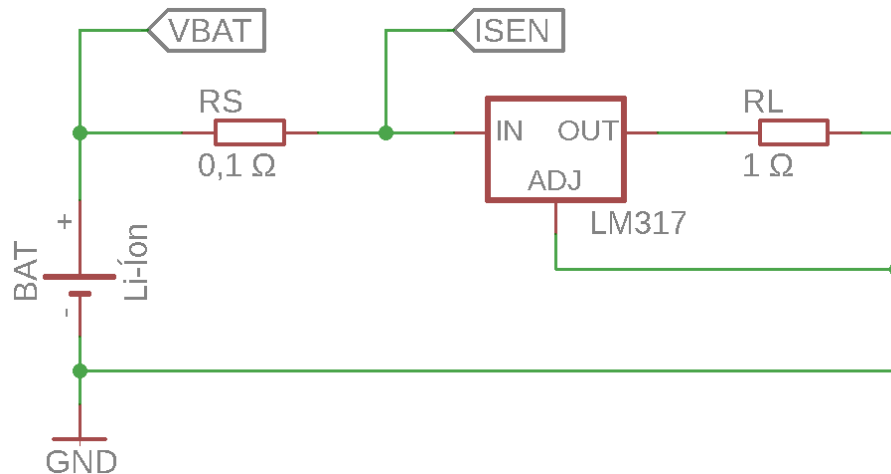


Figura 4.2: Circuito utilizado para realizar medidas de corrente e tensão nos terminais da bateria com uma carga conectada a sua saída.

nominal através do carregamento de baterias completamente descarregadas e da descarga de baterias completamente carregadas.

Tabela 4.2: Capacidade nominal calculada após o processamento dos dados.

Bateria	Capacidade nominal
B1 (carga)	2419 mAh
B1 (descarga)	2363 mAh
B2 (carga)	2395 mAh
B2 (descarga)	2402 mAh

O circuito integrado TP4056 é um carregador para baterias de íon-lítio de uma célula que realiza a recarga em dois estágios, o de corrente contínua e o de tensão contínua, e foi utilizado no ensaio de carregamento das baterias. Nas Figuras 4.3 e 4.4 é possível

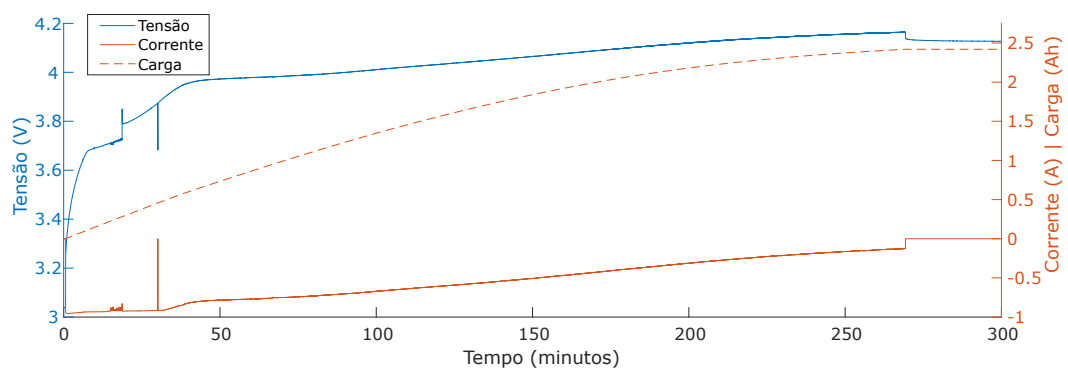


Figura 4.3: Tensão e corrente nos terminais da bateria 1 (B1) e carga armazenada durante um ciclo de carregamento completo.

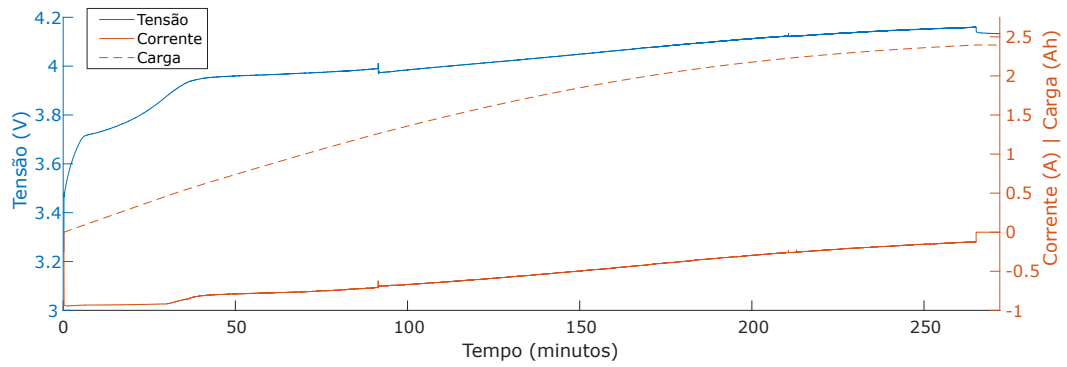


Figura 4.4: Tensão e corrente nos terminais da bateria 2 (B2) e carga armazenada durante um ciclo de carregamento completo.

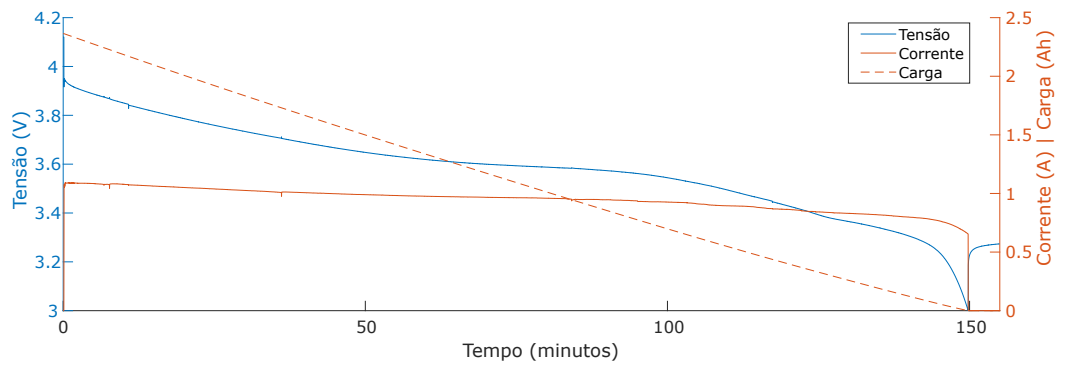


Figura 4.5: Tensão e corrente nos terminais da bateria 1 (B1) e carga restante durante um ciclo de descarga completo.

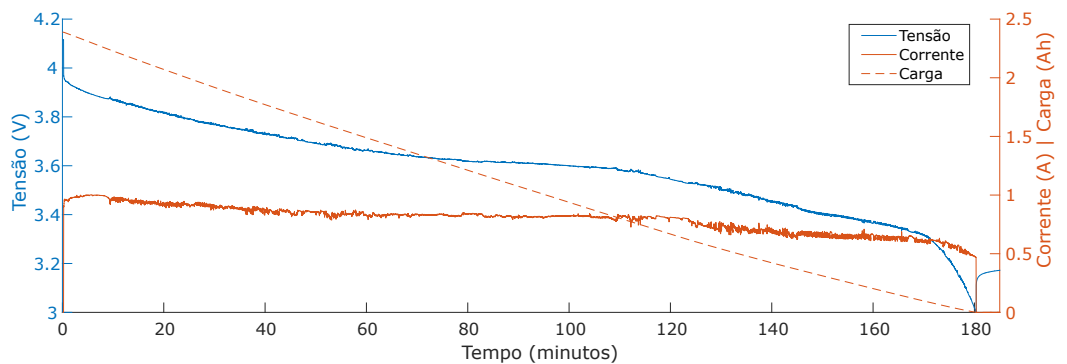


Figura 4.6: Tensão e corrente nos terminais da bateria 2 (B2) e carga restante durante um ciclo de descarga completo.

visualizar o carregamento da célula com corrente constante até cerca de 4,0 volts seguido pela carga em tensão constante até cerca de 4,2 volts onde o carregamento é interrompido pelo TP4056 ao atingir uma corrente de recarga de 100 mA. Entretanto, devido ao resistor *shunt* utilizado para medir a corrente e como as medidas são realizadas nos terminais da bateria, os valores são um pouco menores que o considerado pelo circuito integrado que controla o carregamento e a etapa de tensão constante não se mostra realmente

constante no gráfico. É possível observar nessa etapa que a tensão medida nos terminais sobe conforme a corrente cai, pois a queda de tensão no resistor *shunt* passa a ser menor. Esse método de carregamento, conhecido pela sigla CC-CV, é o mais indicado para baterias de íon-lítio.

Para a realização da descarga completa, um circuito integrado LM317 foi utilizado para manter a corrente constante. As Figuras 4.5 e 4.6 exibem o comportamento da bateria durante o processo de descarga. Pode-se observar que a curva da corrente não permaneceu constante conforme o esperado, o que ocorreu devido a queda de tensão no circuito integrado estar muito próxima aos limites recomendados pelo seu *datasheet*, mas isso não afetou a obtenção da capacidade da bateria.

É possível verificar na Tabela 4.1 que as baterias se encontram com uma capacidade nominal cerca de 7,5% abaixo da definida pelo fornecedor, o que pode ser causado pelos efeitos de envelhecimento, visto que essas células foram adquiridas a mais de um ano, apesar de não terem sido efetivamente utilizadas desde então. Com esses resultados, pode-se dar continuidade ao processo de obtenção dos parâmetros com maior precisão, pois os próximos passos envolvem pulsos de descarregamento de 10% da capacidade, separados por intervalos de relaxação.

#### 4.2.2 Tensão de circuito aberto e resistência interna

Após a carga completa, as baterias ficaram desconectadas por 12 horas, para que sua tensão se estabilize após o processo de relaxação. Passado esse período de repouso, as tensões dos terminais foram checadas, resultando nas seguintes leituras da Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tensões de circuito aberto para as baterias com SoC de 100%.

Bateria	Tensão
B1	4,12 volts
B2	4,09 volts

Esse tipo de medida corresponde ao método de tensão de circuito aberto, que permite a estimação do estado de carga a partir do leitura de tensão após um longo período de inatividade. Os valores para as duas baterias são próximos, mas demonstraram certa diferença, indicando que suas cargas não são idênticas.

Apesar dessa diferença, sabe-se que as baterias estão completamente carregadas e possuem carga semelhante, visto que possuem praticamente a mesma capacidade nominal.

Em seguida, as baterias foram conectadas como mostra o circuito da Figura 4.7, montado especificamente para o obtenção de seus parâmetros internos. Esse circuito possui



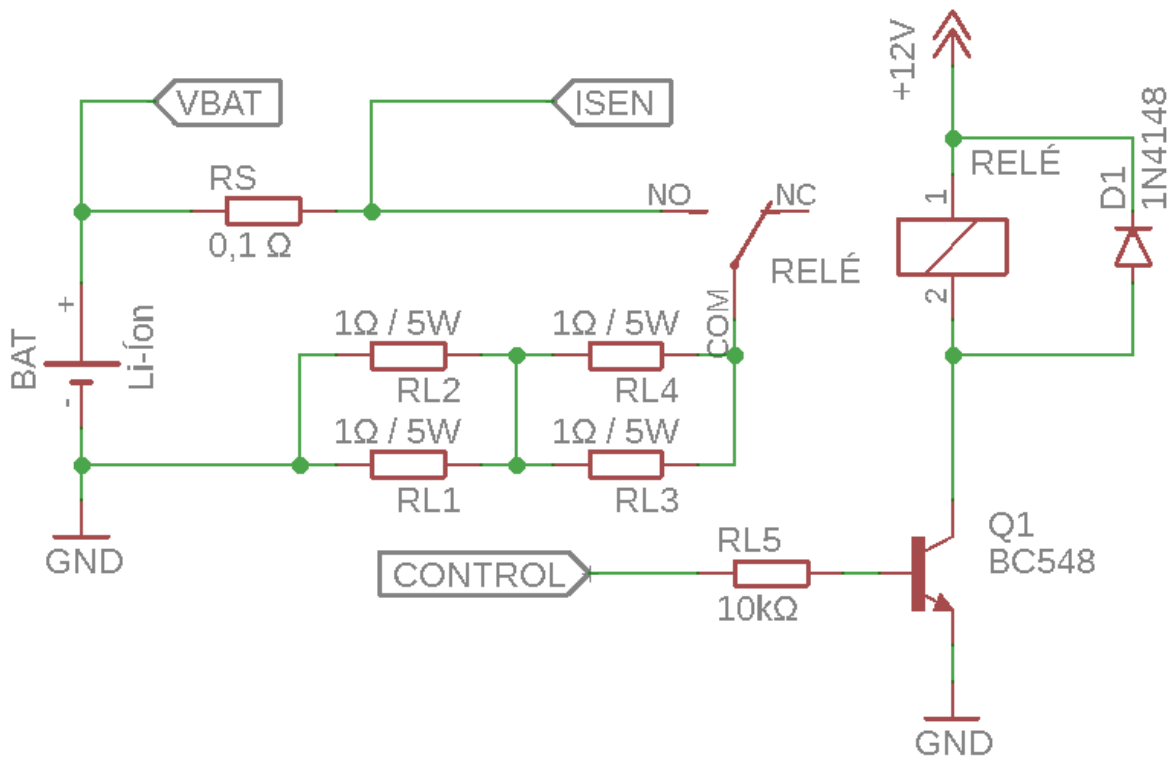


Figura 4.7: Circuito usado para obtenção dos parâmetros internos da bateria.

uma carga de teste, sensor de tensão nos terminais da célula, sensor de tensão no resistor *shunt* (RS) e um microcontrolador que chaveia a carga e realiza a leitura dos sensores.

A carga fica conectada à bateria até consumir 10 % de sua carga e em seguida permanece desconectada por quinze minutos, completando um ciclo, que se repete mais nove vezes até o esgotamento das baterias. Como medida de proteção a carga é desconectada quando a tensão da bateria atinge 3,0 volts, através dos chaveamento do relé. Para esse instante considera-se que o estado de carga equivale a zero e o ensaio é encerrado.

As curvas das Figuras 4.8 e 4.9 descrevem a resposta da bateria para os dez pulsos de descarga, fornecendo onze estados de carga distintos, que podem ser avaliados para a obtenção dos valores iniciais para os componentes do modelo proposto.

Para o cálculo da carga equivalente a 10 %, tomou-se como base a capacidade nominal obtida anteriormente, porém após o término do ensaio observa-se que a capacidade total foi um pouco inferior ao esperado, o que resultou no último pulso mais curto. As cargas das baterias, contabilizadas durante esse ensaio, são expostas na Tabela 4.4.

A capacidade da bateria 2 se mostrou menor que a da bateria 1, o que poderia explicar a diferença de tensão observada na Tabela 4.3. Entretanto, as baterias foram carregadas pelo mesmo circuito carregador que interrompe o processo ao atingir uma corrente de recarga de 100 mA. Possivelmente, devido a efeitos não controlados como a

Tabela 4.4: Capacidade observada durante a obtenção dos parâmetros.

Bateria	Capacidade observada
B1	2303 mAh
B2	2247 mAh

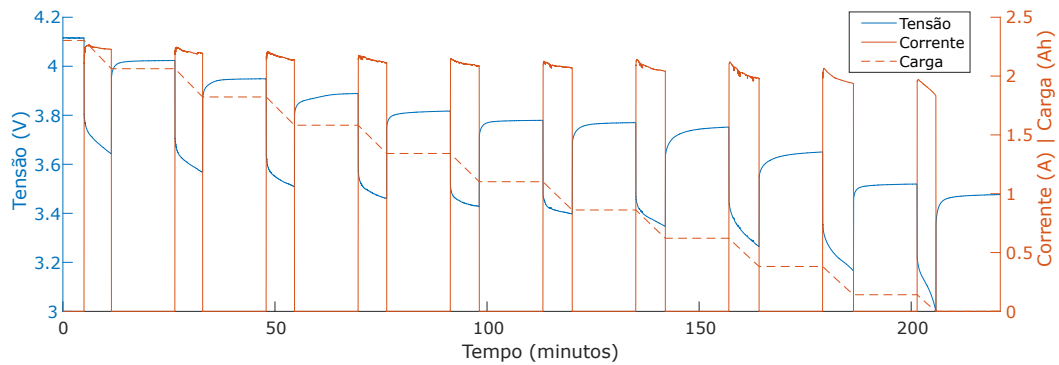


Figura 4.8: Variações de carga aplicados na bateria 1 (B1) para obter os parâmetros do modelo.

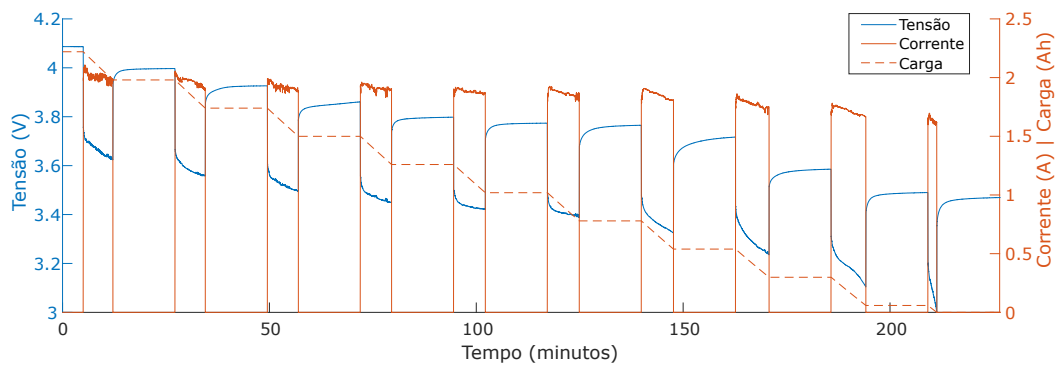


Figura 4.9: Variações de carga aplicados na bateria 2 (B2) para obter os parâmetros do modelo.

temperatura, o carregamento da bateria 2 se encerrou pouco antes do desejado.

Na Figura 4.10 temos quatro pontos que são considerados durante essa análise. O ponto C indica a tensão de circuito aberto para o estado de carga em avaliação. As variações entre os pontos A e B descrevem a resistência interna da bateria para o momento em que ocorre a remoção da carga de teste e os pontos C e D descrevem a mesma resistência para a inserção da carga de teste.

Avaliando esses pontos para as duas baterias, temos os valores das Figuras 4.11 e 4.12. Com essa análise, nota-se um comportamento estranho para o valor da resistência interna, visto que seu valor ficou maior após os 15 minutos de relaxação. De certa forma isso mostra um dos fatores que dificultam a criação de um modelo que descreva a bateria

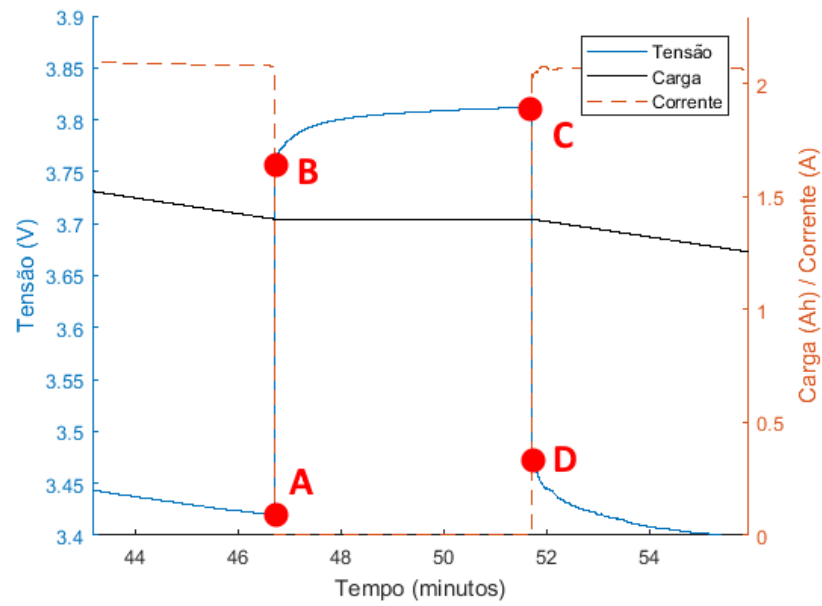


Figura 4.10: Detalhe da influência da resistência interna na tensão dos terminais da bateria.

para qualquer situação.

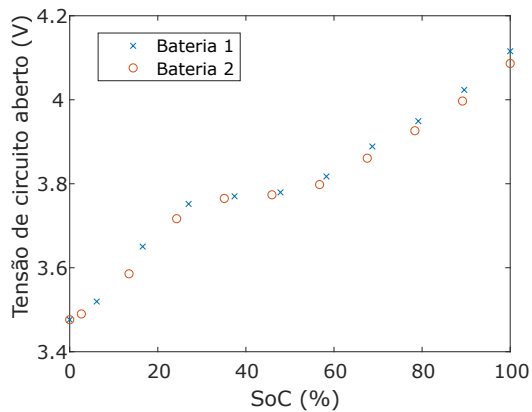


Figura 4.11: Valores de tensão de circuito aberto obtidos a partir dos dados dos ensaios com pulsos de descarga.

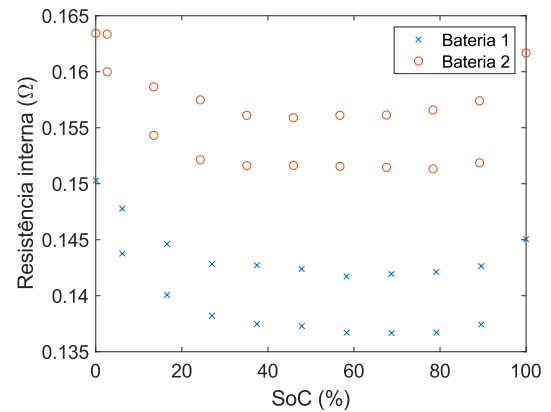


Figura 4.12: Valores de resistência interna obtidos a partir dos dados dos ensaios com pulsos de descarga.

A curva de tensão de circuito aberto obtida possui o formato esperado.

A resistência interna da bateria 1 é menor que a da bateria 2, mas os valores para as duas baterias estão dentro da especificação do fornecedor (vide Tabela 4.1). A forma das curvas obtidas para a resistência são muito semelhantes, com seus valores crescendo nos extremos do SoC e bem constantes entre 20% e 80%.

### 4.2.3 Associação RC paralelo

Os parâmetros da associação RC paralelo ( $R1$  e  $C1$ ) são mais difíceis de estimar que os parâmetros da tensão de circuito aberto ( $E_o$ ) e da resistência interna ( $R_{in}$ ). Seria possível avaliar a constante de tempo das curvas para a estimativa inicial, entretanto isso exigiria uma análise minuciosa do sinal amostrado, sendo que não há garantia de obtenção de uma boa estimativa.

A ferramenta *Simulink* está sendo utilizada para as execução das simulações do modelo. Uma de suas ferramentas de análise é a *Parameter Estimation*, que permite a estimação dos parâmetros do modelo. Essa ferramenta permite a entrada dos parâmetros a serem ajustados, estados iniciais e um experimento (conjunto de dados) que será comparado com a saída da simulação durante a estimação.

Os parâmetros são definidos por *lookup tables* que relacionam 11 valores de SoC para valores de parâmetros. Essas tabelas transformam um conjunto de valores definidos para alguns estados de carga em outros valores para estados de carga não mapeados na tabela. O tipo de conversão escolhido foi o de interpolação linear.

A principal vantagem desse método é a rapidez na estimação dos parâmetros, visto que apenas 4 conjuntos de 11 valores precisam ser ajustados, os quais são usados em seguida para qualquer valor de estado de carga durante a simulação.

Utilizando os valores de  $E_o$  e  $R_{in}$  das Figuras 4.11 e 4.12, valores quaisquer para  $R1$  e  $C1$  e utilizando as curvas das Figuras 4.8 e 4.9 como dados de experimento, a ferramenta de estimação de parâmetros realizou várias iterações minimizando a soma dos quadrados dos erros do sinal simulado com relação ao sinal medido.

Com o término da estimação para as duas baterias, os valores obtidos para os parâmetros  $E_o$ ,  $R_{in}$ ,  $R1$  e  $C1$  estão dispostos na Figura 4.13.

As curvas das duas baterias se aproximaram bastante, tendo comportamentos semelhantes para os diversos valores de estado de carga. Os parâmetros  $E_o$  e  $R_{in}$  não sofreram grandes alterações, quando comparados aos valores obtidos analisando os pontos da Figura 4.10. Assim como constatado anteriormente, a resistência interna cresce rapidamente quando a capacidade total se aproxima de zero.

A bateria 2 demonstrou novamente que possui maior resistência interna e os valores permaneceram abaixo do especificado pelo fornecedor.

Com os resultados obtidos acima, é possível observar que os parâmetros possuem um comportamento praticamente linear para valores de SoC entre 25 % e 50 %.

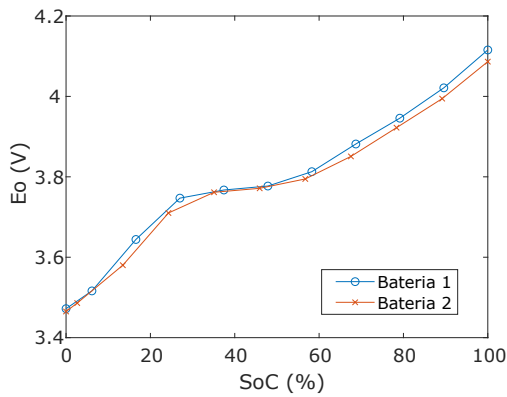
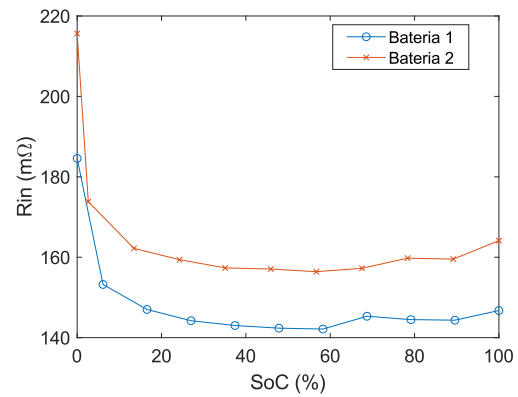
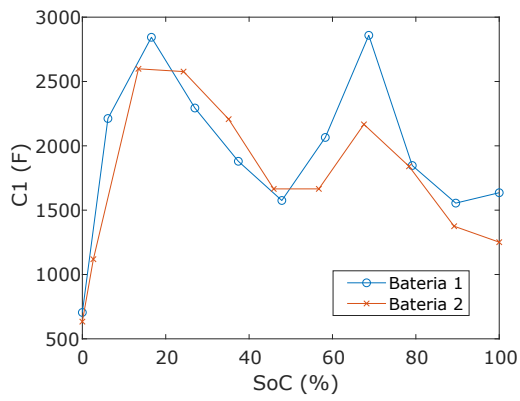
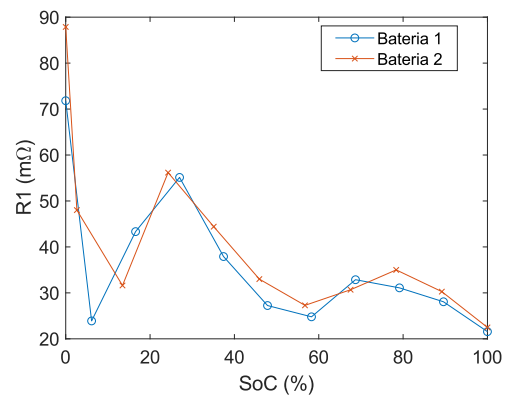
(a) Tensão de circuito aberto ( $E_o$ ).(b) Resistência interna ( $R_{in}$ ).(c) Capacitor ( $C1$ ) da associação RC paralelo.(d) Resistência ( $R1$ ) da associação RC paralelo.

Figura 4.13: Parâmetros estimados para as baterias.

### 4.3 Equivalente de Thévenin

Sabe-se que é possível obter um circuito equivalente de Thévenin que descreve um circuito desconhecido através de uma fonte de tensão e uma impedância em série.

Nessa subseção a bateria de íon lítio será avaliada e seu equivalente de Thévenin será obtido, a fim de verificar se apenas com esse equivalente é possível estimar seu estado de carga com precisão.

Pelo teorema de Thévenin, temos que a tensão e impedância de Thévenin são dados

$$V_{th} = V_{oc} \quad (4.5)$$

$$R_{th} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}. \quad (4.6)$$

onde  $V_{oc}$  corresponde a tensão de circuito aberto e  $I_{sc}$  a corrente de curto circuito. Entretanto, muitas vezes não é possível medir a tensão de circuito aberto de uma bateria, devido a inviabilidade de remoção da carga. A corrente de curto-circuito também não

pode ser medida, visto que as baterias de lítio não podem ter seus terminais associados em curto, o que pode danificar a bateria permanentemente ou até mesmo iniciar um processo aquecimento descontrolado que pode causar incêndio. Com duas medidas de corrente e tensão nos terminais da bateria pode-se escrever (MOHSENIZADEH; NOUNOU; NOUNOU; DATTA; BHATTACHARYYA, 2015):

$$\begin{bmatrix} I_{bat}(1) & -1 \\ I_{bat}(2) & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{th} \\ V_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{bat}(1) \\ -V_{bat}(2) \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Para obter (4.7) não é necessário abrir o circuito nem gerar um curto-circuito, basta realizar duas medidas com carga de saída distintas. Essa técnica permite a avaliação do equivalente de Thévenin com o sistema operando (*online*).

#### 4.3.1 Conversor CC-CC

Para variar a carga de saída vista pela bateria, um conversor CC-CC do tipo *buck* foi implementado. Isso permitiu o controle da corrente e tensão de saída da bateria através da *Beagle Bone Green*. O circuito da Figura 4.14 foi montado e um controlador PI foi implementado e ajustado, até que se obteve uma resposta rápida o suficiente para a realização de novos ensaios. O digrama de blocos da Figura 4.15 mostra o sistema realimentado com controlador PI.

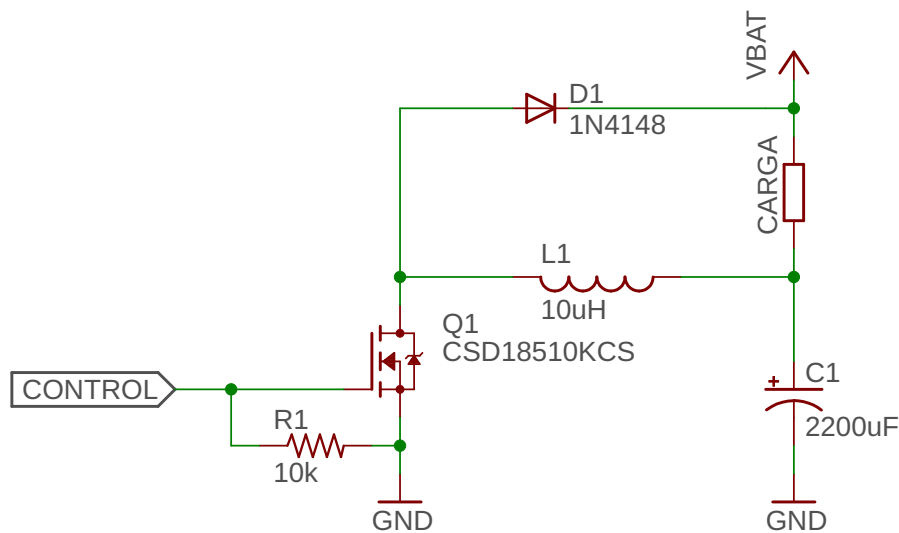


Figura 4.14: Conversor abaixador de tensão do tipo *buck*.

O transistor do conversor CC-CC é chaveado através de um sinal de modulação por largura de pulso, onde a saída do controlador corresponde ao ciclo de trabalho dessa

modulação. O erro considerado pelo controlador PI é a diferença entre a corrente desejada e a corrente medida pelo conversor analógico-digital.

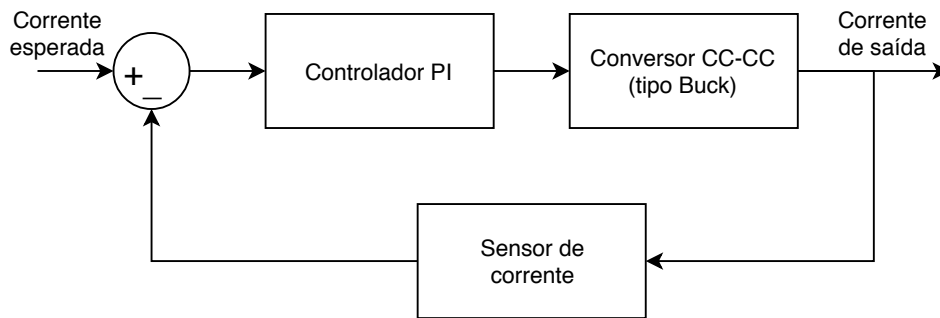


Figura 4.15: Diagrama de blocos do controlador PI.

O conversor CC-CC viabiliza o cálculo do equivalente de Thévenin. Após o circuito do conversor ser montado e testado em bancada, o seguinte ensaio foi elaborado e executado.

Uma descarga completa foi realizada com uma padrão de pulsos como o da Figura 4.16, variando a corrente entre 150mA e 100mA até cerca de 50 % do SoC e em seguida entre 100mA e 80mA. Essa diferença foi necessária pois a carga de saída possuía LEDs de alta intensidade que exigiam tensão de cerca de 3,3 volts para operar e com a descarga da bateria, a corrente máxima reduziu gradativamente.

Com isso obtém-se as curvas de tensão e resistência de Thévenin da Figura 4.17. Essas medidas se mostraram muito interessantes e possibilitam a estimação do estado de carga das baterias pelo método da tensão de circuito aberto com o sistema *online*. A faixa de 0 % a 5 % do SoC não foi analisada pois a tensão não era suficiente para a variação da corrente na carga da saída.

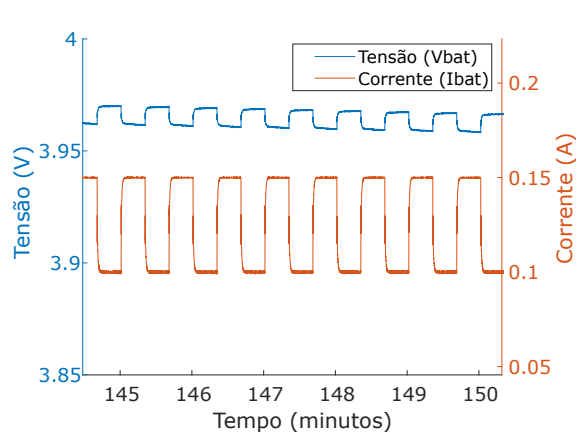


Figura 4.16: Variações na carga para o cálculo do equivalente de Thévenin.

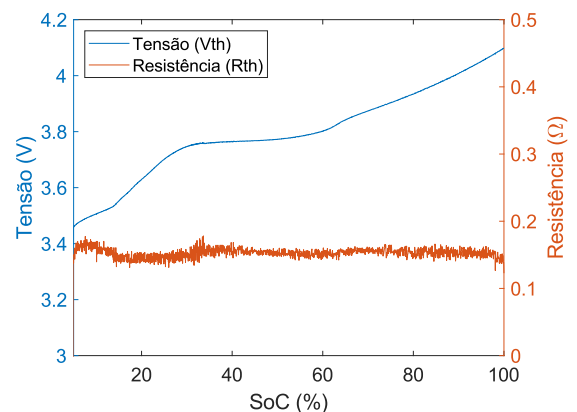


Figura 4.17: Tensão e resistência de Thévenin obtidos para o SoC variando de 5 % a 100 %.

Porém, o ensaio foi realizado com pulsos com duração de 20 segundos e a análise para cada ponto ocorria em uma situação praticamente de corrente contínua. Além disso, a

impedância de Thévenin se mostrou muito linear o que não condiz com a curva observada para a resistência interna obtida anteriormente. Vale ressaltar que a impedância de Thévenin equivale à associação RC-paralelo em série com a resistência interna do modelo da Figura 4.1.

A fim de avaliar melhor o uso dessa técnica, um novo ensaio foi elaborado. Dessa vez a faixa de correntes aplicadas à carga de saída seria muito maior, variando de 0 a 1,5 amperes, com passos menores. A Figura 4.18 exibe com detalhes um ciclo do ensaio. Esse ensaio foi executado como o anterior, a partir da bateria completamente carregada até seu esgotamento.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.19. Observa-se um crescimento no valor da tensão de Thévenin até o ponto em que a corrente da bateria deixa de ser crescente e passa a decrescer, onde ocorre uma queda brusca de seu valor, o qual passa a crescer novamente. O mesmo ocorre com a impedância de Thévenin. Esse comportamento não ocorreu no ensaio anterior, pois as condições de análise eram praticamente constantes para cada ponto tomado, enquanto no novo ensaio a análise ocorre com a corrente variando a cada passo, sem o repouso de 20 segundos.

O equivalente de Thévenin obtido não é muito interessante devido a grande variação nos valores, dependendo do ponto onde as medidas são realizadas. Isso demonstra que é necessário conhecer a dinâmica de operação do sistema que está sendo avaliado, de modo que a variação na carga realizada para a tomada da medida deva ser bem conhecida e permita que ocorra os efeitos de relaxação e polarização.

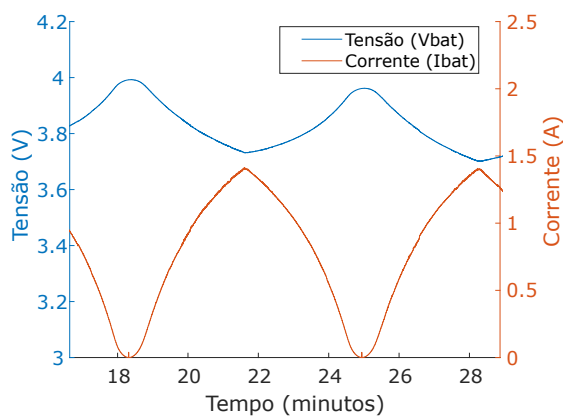


Figura 4.18: Variação de carga conectada à bateria para o cálculo do equivalente de Thévenin.

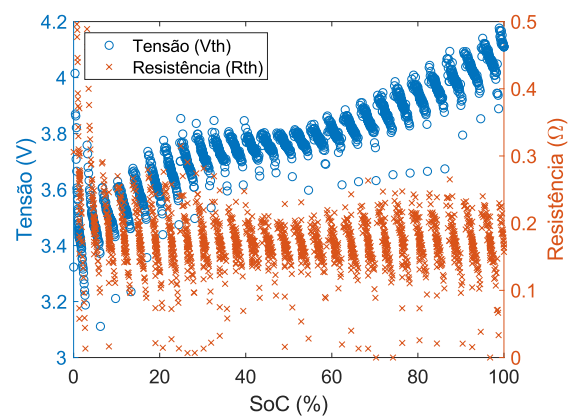


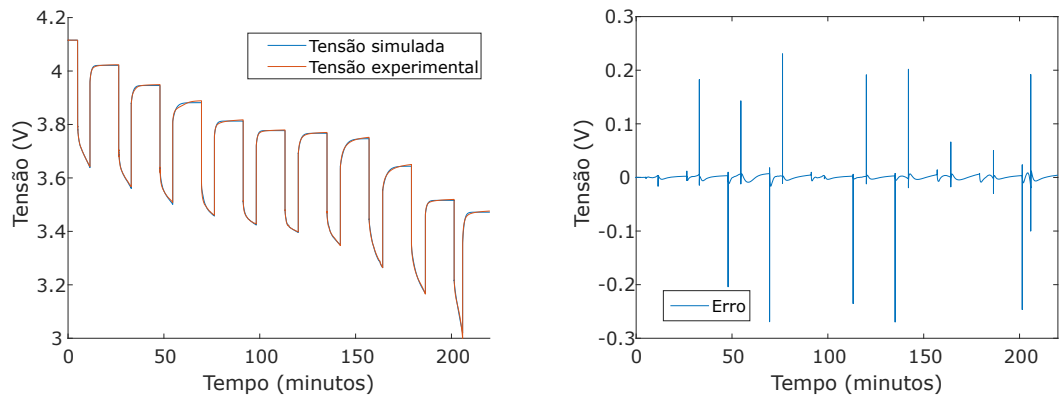
Figura 4.19: Tensão e impedância de Thévenin obtidos para o SoC variando de 0% a 100%.

#### 4.4 Resultados das simulações usando um modelo com uma associação RC paralelo

Os parâmetros estimados foram salvos e serão utilizados em simulações do modelo através do *Simulink*. A primeira comparação entre a resposta do modelo simulado será

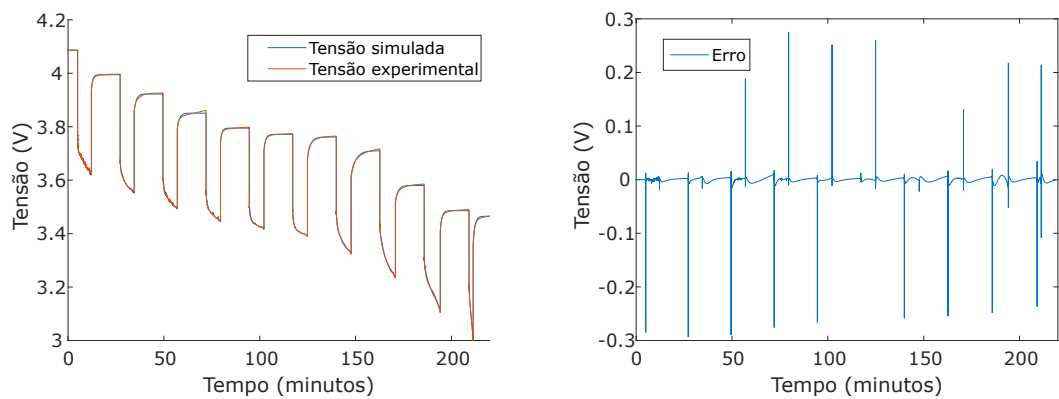


dada com as curvas dos ensaios realizados para a obtenção dos parâmetros da bateria. As Figuras 4.20 e 4.21 mostram os resultados das primeiras simulações, possibilitando a comparação entre os níveis de tensão do modelo simulado com os obtidos durante o ensaio e também mostrando a diferença entre essas duas curvas.



(a) Tensão obtida através de simulação e a obtida no ensaio. (b) Diferença (erro) entre a tensão obtida em simulação e ensaio.

Figura 4.20: Resultados da simulação para a bateria 1 com relação ao ensaio realizado durante a obtenção dos parâmetros.



(a) Tensão obtida através de simulação e a obtida no ensaio. (b) Diferença (erro) entre a tensão obtida em simulação e ensaio.

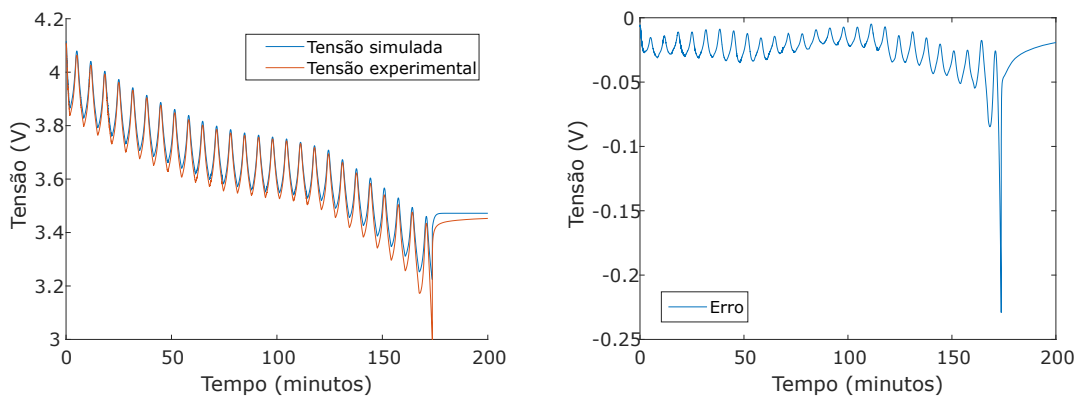
Figura 4.21: Resultados da simulação para a bateria 2 com relação ao ensaio realizado durante a obtenção dos parâmetros.

Podemos observar que a diferença entre as curvas permanece bem próxima de zero, o que é de se esperar, visto que foram essas as curvas utilizadas pela ferramenta *Parameter Estimation* durante a estimação. O modelo com apenas uma associação RC paralelo conseguiu descrever os efeitos de polarização e relaxação para o tipo de bateria escolhido. A exceção ocorre nos pontos onde ocorre o início ou fim dos pulsos, onde o erro possui picos momentâneos. Com esse resultado ficou claro que a estimativa foi válida, mas ainda precisamos comparar o resultado de simulações com outras curvas conhecidas.

Agora a simulação será comparada com a curva do ensaio realizado para a obtenção do equivalente de Thévenin (Figura 4.18). Essa curva foi escolhida, pois ela possui uma larga faixa de valores de corrente para todos os valores de SoC, abrangendo grande parte da região de operação normal da bateria.

A Figura 4.22 mostra os valores de tensão simulados junto aos valores coletados no ensaio e traça a curva da diferença entre os dois valores de tensão. Os valores simulados permaneceram muito próximo do esperado, mas é possível notar um deslocamento praticamente constante para todo o período de descarga da bateria. Também é possível notar que com a variação da corrente aplicada, o erro varia, indicando que a resistência interna também sofreu uma leve alteração. Esses deslocamentos podem ter ocorrido pois o ensaio ocorreu em outro dia e não há controle sobre a temperatura ambiente.

Note que o erro foi menor para a região de meia descarga da bateria (próxima aos 50 %), onde existe o problema da tensão de circuito aberto ser muito constante e qualquer variação na tensão pode representar um grande erro na estimativa do SoC. Também é notável o grande crescimento do erro na faixa final da curva traçada, onde a bateria já se encontrava com um estado de carga muito próximo de zero e o modelo não conseguiu demonstrar bem sua resposta nessa situação.



(a) Tensão obtida através de simulação e a obtida no ensaio. (b) Diferença (erro) entre a tensão obtida em simulação e ensaio.

Figura 4.22: Resultados da simulação para a bateria 1 com relação ao ensaio realizado para a obtenção do equivalente de Thévenin.

## 5 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO NOTURNA COM PAINEL FOTOVOLTAICO

Esse capítulo trata do desenvolvimento de um sistema de iluminação noturna alimentado por baterias que são recarregadas durante o dia através de painéis fotovoltaicos. O intuito é demonstrar uma utilidade do método da contagem de Coulomb e também realizar sua validação em uma aplicação prática. Os componentes utilizados são simples e de baixo custo, servindo como um meio de validar o conceito proposto.

O sistema embarcado foi implementado em uma placa de desenvolvimento *Beagle Bone Green*. Nesse sistema são realizados os cálculos do método estimador de estado de carga, a leitura de módulos sensores de tensão, a manipulação das medidas realizadas e o controle da corrente de saída para um sistema de iluminação através de um conversor CC-CC. Durante o período entre o pôr do sol e o nascer do sol, inicia-se a gestão da potência entregue ao sistema de iluminação, com base na carga disponível calculada e na ideia de manter a iluminação com uma intensidade constante durante todo esse período.

### 5.1 Arquitetura

A arquitetura da Figura 5.1 descreve um sistema de armazenamento de energia *off-grid*, ou seja, onde não há conexão com a rede elétrica. Os componentes listados abaixo foram usados na implementação da arquitetura.

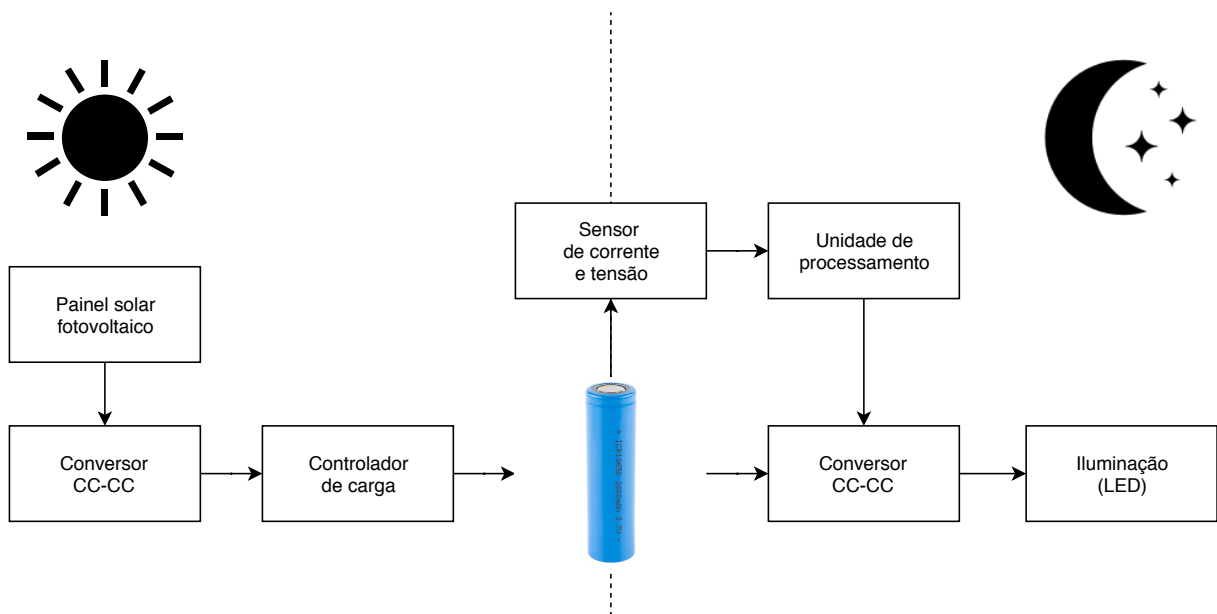


Figura 5.1: Arquitetura do sistema de iluminação noturna alimentado por bateria de íon lítio.

### 5.1.1 Implementação

O painel solar fotovoltaico utilizado pode produzir até 3 W com tensão de 12 volts. Essa tensão teve que ser abaixada para 5 volts por conta dos limites elétricos máximos do controlador de carga e para isso foi utilizado um regulador linear, visto que a potência máxima é muito baixa e apesar da baixa eficiência, o objetivo é a prova do conceito. O controlador de carga utiliza um circuito integrado CN3065 que é indicado para aplicações com painéis fotovoltaicos e possui carregamento do tipo CV-CC, assim como o outro circuito integrado utilizado para o carregamento das baterias na Seção 4.2.1.

A bateria identificada pelo número 2 foi a utilizada nesse experimento. Como é necessário conhecer o estado de carga inicial para a utilização do método de contagem de Coulomb, foi realizada sua descarga completa antes do início dos testes.

Como não é necessário conhecer a corrente que é fornecida aos LEDs, mas sim a corrente que entra e sai da bateria, apenas o sensor de corrente em seus terminais já é suficiente. Em outras aplicações, no caso da corrente de saída para a carga externa ser necessária, um novo sensor de corrente deve ser adicionado para obter essa medida, porém se a aplicação possuir a mesma característica de só controlar a carga de saída durante a noite, apenas o sensor de corrente nos terminais já é suficiente, visto que não há corrente de entrada pelo painel fotovoltaico durante a noite e portanto a corrente nos terminais da bateria equivale a corrente na carga externa.

O sensor usado para medir a corrente e tensão da bateria foi o mesmo utilizado anteriormente na obtenção dos dados de teste, assim como o conversor buck, que realizará o controle da corrente fornecida para o sistema de iluminação. A unidade de processamento continuou sendo a placa de desenvolvimento *Beagle Bone Green*.

### 5.1.2 Sistema embarcado

Todo o processamento foi realizado através de códigos Python que realizavam a comunicação com os sensores, iteravam o controlador PI, chaveavam o transistor do conversor buck com modulação por largura de pulso (PWM) e registravam os dados necessários para posterior análise.

A implementação do controlador PI e o cálculo dos horários do nascer e pôr do sol ocorreram através do uso de bibliotecas Python.

O sistema verificava se era dia e mantinha os LEDs desconectados da bateria através do chaveamento de um relé. Ao identificar que estava de noite, ocorria a conexão dos LEDs e o controlador passava a atuar. Com base na carga armazenada ( $C$ ), o sistema fazia o seguinte cálculo,

$$I_{max}(t) = \frac{C(t)}{T_{noite}(t)} \quad (5.1)$$

onde  $I_{max}$  resultava na máxima corrente que poderia ser drenada de forma constante pelos LEDs sem que a bateria se esgotasse e  $T_{noite}$  indicava a quantidade de segundos até o nascer do sol. Dessa forma, mesmo se o controle de corrente falhar momentaneamente, a corrente máxima se ajustaria.

## 5.2 Contagem de Coulomb

O sistema utilizava o método de contagem de Coulomb para obter a carga armazenada na bateria. Seu cálculo ocorreu na mesma forma que em (3.1).

A Figura 5.2 mostra as curvas de tensão, corrente e carga para um período de 24 horas, começando ao nascer do sol do dia 24 de novembro de 2018.

Durante o dia ocorreram vários picos de corrente durante o carregamento, principalmente durante a tarde, pois o tempo se encontrava parcialmente nublado. Por volta das 19:36 ocorreu o pôr do sol e com isso a iluminação LED foi alimentada, com uma corrente constante de cerca de  $72mA$ , permanecendo assim até o nascer do sol.

A curva da carga mostra um crescimento aleatório seguido de uma queda constante até zero.

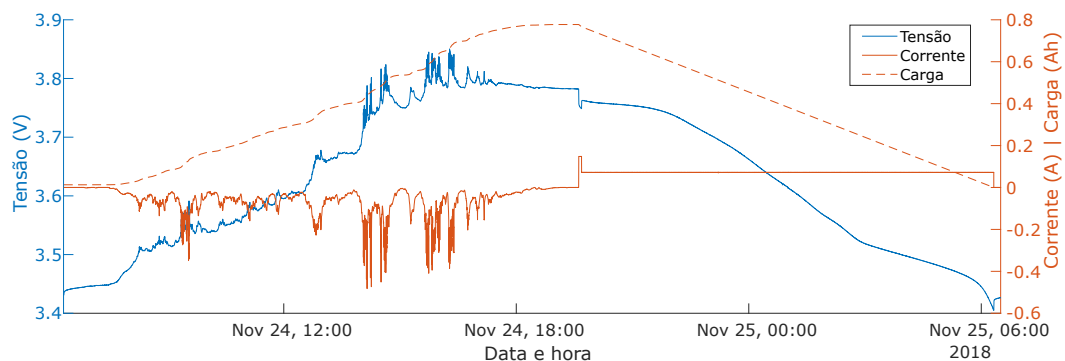
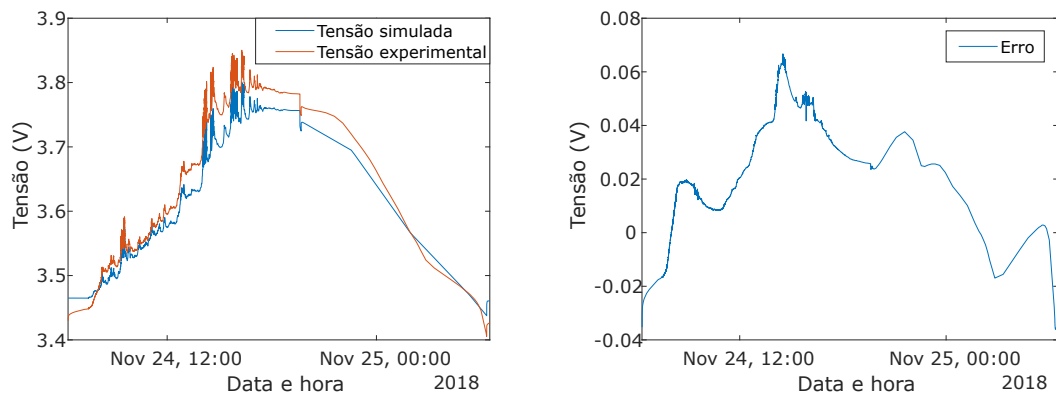


Figura 5.2: Perfil de carga e descarga entre 24 e 25 de novembro de 2018.

### 5.2.1 Comparativo entre dados experimentais e simulados

Mais uma vez o modelo foi simulado e comparado, fornecendo os gráficos da Figura 5.3. Assim como no comparativo da Figura 4.22, o erro possuiu variação com amplitude máxima próxima de  $50mV$ , porém dessa vez o erro cruzou o eixo zero. Como esses dados abrangeram 24 horas ininterruptas, o efeito da variação do erro aparenta ter se relacionado com a variação da temperatura durante um dia, o que não era possível de se observar nos outros ensaios que geralmente possuíam durações de cerca de 4 horas.



(a) Tensão obtida através de simulação e a obtida no ensaio. (b) Diferença (erro) entre a tensão obtida em simulação e ensaio.

Figura 5.3: Resultados da simulação para a bateria 2 com relação aos dados coletados pelo sistema de iluminação noturna.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o sistema de gestão de energia que controla a potência fornecida ao sistema de iluminação noturna foram satisfatórios. O método da contagem de Coulomb forneceu um valor para o estado de carga, o qual foi interpretado pelo sistema de controle da corrente fornecida ao sistema de iluminação e possibilitou a sua operação sem interrupções e com intensidade constante. Uma das vantagens desse método para a aplicação em questão é a obtenção da carga armazenada em  $Ah$ , que possui relação direta no cálculo da corrente de saída para o período de uma noite.

Esse método fornece um valor de estado de carga incorreto com o passar do tempo, devido aos problemas de acumulo de erro retratados anteriormente. Entretanto, é possível implementar um algoritmo que redefina esse valor durante os ciclos de operação, sendo que bastaria identificar pontos mais conhecidos como o de 0 % de estado de carga. Também, seria interessante a recalibração da capacidade nominal, através do método utilizado nesse trabalho, permitindo uma estimativa mais precisa do valor do estado de carga, mesmo com os efeitos de envelhecimento.

As desvantagem desse método de recalibração seriam a necessidade da inclusão de um sistema de carregamento e também da necessidade de descarga completa da bateria o que nem sempre é viável no sistema de célula única utilizado neste trabalho. Por outro lado, em um sistema com um número maior de células de íon lítio, seria possível implementar um sistema inteligente que isola células específicas para a recalibração, enquanto as outras continuam operando, tornando esse método viável.

O modelo proposto para a bateria foi capaz de descrever o seu comportamento para situações de estado de carga e corrente distintos. Porém, ao desprezar os efeitos da temperatura e de envelhecimento, o modelo pode deixar de fornecer uma resposta confiável até mesmo para um curto período de tempo. Com a consideração desses efeitos, o modelo passaria a fornecer uma resposta mais próxima ao real, ao custo de uma maior complexidade e dificuldade na estimação dos parâmetros.

Os parâmetros estimados apresentaram bons resultados para o sistema em situações de descarga, mas não conseguiram aproximar a saída simulada da experimental dos primeiros ensaios, que envolveram o carregamento da bateria. Assim como a sua capacidade nominal, esses parâmetros variam com o passar do tempo e também com as condições de uso da bateria. Essa variação, principalmente de acordo com as condições de uso, representa um grande desafio para a área. Através do método do equivalente de Thévenin buscou-se uma alternativa ao modelo adotado, porém os resultados obtidos não refletiram as expectativas. Com base nisso, listo alguns trabalhos que podem ser realizados no futuro.

## 6.1 Trabalhos futuros

A implementação do filtro de Kalman estendido seria muito interessante para a realização de um comparativo com o método da contagem de Coulomb.

Os resultados obtidos pelo método do equivalente de Thévenin podem se relacionar com alguns parâmetros difíceis de obter como o fator de envelhecimento da célula. Portanto, seria interessante a análise desses dados com relação a esses parâmetros.

Verificar o efeito da temperatura na capacidade útil e tensão de circuito aberto da bateria.



## REFERÊNCIAS

- BACCOUCHE, I.; JEMMALI, S.; MLAYAH, A.; MANAI, B.; AMARA, N. E. B. Implementation of an improved coulomb-counting algorithm based on a piecewise soc-ocv relationship for soc estimation of li-ion battery. **CoRR**, abs/1803.10654, 2018.
- BASTOS, R. F. **Sistema de gerenciamento para carga e descarga de baterias (chumbo-ácido) e para busca do ponto de máxima potência gerada em painéis fotovoltaicos empregados em sistemas de geração distribuída**. 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- CHANG, W.-Y. The state of charge estimating methods for battery: A review. **Hindawi Publishing Corporation, ISRN Applied Mathematics**, p. 1–7, 2013.
- CHEN, M.; RINCON-MORA, G. A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 2, p. 504 – 511, 2006.
- CHEN, X.; SHEN, W.; VO, T. T.; CAO, Z.; KAPOOR, A. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. p. 230–235, 2012. ISSN 1947-1270.
- DOMENICO, D. D.; STEFANOPOULOU, A.; FIENGO, G. Lithium-ion battery state of charge and critical surface charge estimation using an electrochemical model-based extended kalman filter. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, ASME, v. 132, p. 061302–061302–11, 2010.
- FURLAN, A. L. **Análise Comparativa de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica**. 2008. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- HU, X.; LI, S.; PENG, H. A comparative study of equivalent circuit models for li-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 198, p. 359 – 367, 2012.
- JACKEY, R. et al. Battery model parameter estimation using a layered technique: An example using a lithium iron phosphate cell. **SAE Technical Paper**, SAE International, 2013.
- KIM, T. et al. Model-based condition monitoring for lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 295, p. 16 – 27, 2015. ISSN 0378-7753.
- LAI, X.; ZHENG, Y.; SUN, T. A comparative study of different equivalent circuit models for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries. **Electrochimica Acta**, v. 259, p. 566 – 577, 2018. ISSN 0013-4686.
- LI, Y. et al. Effects of temperature on dynamic characteristics of li-ion batteries in electric vehicle applications. p. 1–6, 2014.
- MAY, G. J.; DAVIDSON, A.; MONAHOV, B. Lead batteries for utility energy storage: A review. **Journal of Energy Storage**, v. 15, p. 145 – 157, 2018.

- 
- MEKONNEN, Y.; SUNDARARAJAN, A.; SARWAT, A. I. A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries. p. 1–6, 2016.
- MOHSENIZADEH, N.; NOUNOU, H.; NOUNOU, M.; DATTA, A.; BHATTACHARYYA, S. P. Linear circuits: a measurement-based approach. **International Journal of Circuit Theory and Applications**, v. 43, n. 2, p. 205–232, 2015. ISSN 1097-007X.
- PILLER, S.; PERRIN, M.; JOSSEN, A. Methods for state-of-charge determination and their applications. **Journal of Power Sources**, v. 96, n. 1, p. 113 – 120, 2001. ISSN 0378-7753. Proceedings of the 22nd International Power Sources Symposium.
- PÓZNA, A. I.; MAGYAR, A.; HANGOS, K. M. Model identification and parameter estimation of lithium ion batteries for diagnostic purposes. **2017 International Symposium on Power Electronics (Ee)**, p. 1–6, 2017.
- RONG, P.; PEDRAM, M. An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries. **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**, v. 14, n. 5, p. 441–451, 2006. ISSN 1063-8210.
- SAIDANI, F.; HUTTER, F. X.; SCURTU, R.-G.; BRAUNWARTH, W.; BURGHARTZ, J. Lithium-ion battery models: A comparative study and a model-based powerline communication. **Advances in Radio Science**, v. 15, p. 83–91, 2017.
- SANTHANAGOPALAN, S.; WHITE, R. E. State of charge estimation using an unscented filter for high power lithium ion cells. **International Journal of Energy Research**, v. 34, n. 2, p. 152–163, 2009.
- SCROSATI, B.; CROCE, F.; PANERO, S. Progress in lithium polymer battery r&d. **Journal of Power Sources**, v. 100, n. 1, p. 93 – 100, 2001.
- THACKERAY, M. M.; WOLVERTON, C.; ISAACS, E. D. Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. **Energy Environ. Sci.**, v. 5, p. 7854 – 7863, 2012.
- WANG, Y.; FANG, H.; ZHOU, L.; WADA, T. Revisiting the state-of-charge estimation for lithium-ion batteries: A methodical investigation of the extended Kalman filter approach. **IEEE Control Systems**, v. 37, n. 4, p. 73–96, 2017. ISSN 1066-033X.
- XIONG, R.; HE, H.; GUO, H.; DING, Y. Modeling for lithium-ion battery used in electric vehicles. **Procedia Engineering**, v. 15, p. 2869 – 2874, 2011.
- ZHANG, L.; PENG, H.; NING, Z.; MU, Z.; SUN, C. Comparative research on rc equivalent circuit models for lithium-ion batteries of electric vehicles. **Applied Sciences**, v. 7, n. 10, 2017.