

Desenvolvimento de uma Plataforma de Testes e Automatização do Processo de Carga e Descarga para Baterias de Li-Po ^{*}

Gustavo Eckhardt ^{*} Douglas F. Copetti ^{**} Leonardo A. B. Viera ^{***}
Gustavo T. Machado ^{****} Paulo S. Sausen [†] Maurício de Campos [†]
Airam T. Z. R. Sausen [†] Fabiano Salvadori [‡]

^{*} Aluno do Curso de Engenharia Elétrica, UNIJUÍ, RS,
(e-mail: eckhardt.gustavo@gmail.com).

^{**} Aluno do Curso de Engenharia Elétrica, UNIJUÍ, RS,
(e-mail: douglas.copetti@sou.unijui.edu.br).

^{***} Mestrando em Engenharia Elétrica, UFSM, RS,
(e-mail: leonardo.vieraa@outlook.com)

^{****} Aluno do Curso de Ciências da Computação, UNIJUÍ, RS,
(e-mail: gustavo.machado@unijui.edu.br)

[†] Professores do Programa em Modelagem Matemática e
Computacional, UNIJUÍ, RS, (e-mail: sausen@unijui.edu.br,
campos@unijui.edu.br, airam@unijui.edu.br)

[‡] Professor do curso de Engenharia Elétrica, UFPB, PB,
(e-mail: salvadori.fabiano@cear.ufpb.br)

Abstract: The use of battery-powered devices is restricted to the energy available in the battery. Therefore, it is important to have comprehensive mathematical models that can predict the state of charge of a battery. In order to develop and especially validate these models, real data regarding long duration tests of these batteries are needed. In this paper, the development of a battery testing platform (*i.e.*, *Testbed*) is presented, as well as a methodology for perform long duration controlled tests in order to automate the charging and discharging process. The platform and methodology are validated through a series of tests with Li-Po batteries. The results of these tests are presented and analyzed and it is possible to verify the efficiency of both the *Testbed* and the methodology presented for the development and analysis of tests using Li-Po batteries.

Resumo: A utilização de dispositivos alimentados por baterias é restrita a energia disponível na mesma. Portanto, é importante que existam modelos matemáticos abrangentes que possam prever o estado de carga de uma bateria. Para desenvolver e principalmente validar estes modelos são necessários dados reais referentes a ensaios de longa duração destas baterias. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma plataforma de testes de bateria (*i.e.*, *Testbed*), bem como uma metodologia para a realização de ensaios controlados de longa duração, a fim de automatizar o processo de carga e descarga. A plataforma e a metodologia são validadas através de uma série de ensaios com baterias de Li-Po. Os resultados destes ensaios são apresentados e analisados sendo possível constatar a eficiência tanto do *Testbed* como da metodologia apresentada para o desenvolvimento e análise dos ensaios utilizando baterias de Li-Po.

Keywords: Battery; Testing platform; Controlled trials; Automation; Lifetime; Mathematical modeling; Data acquisition.

Palavras-chaves: Bateria; Plataforma de testes; Ensaios controlados; Automação; Tempo de vida; Modelagem matemática; Aquisição de dados.

1. INTRODUÇÃO

A popularização dos dispositivos móveis como ferramentas multitarefas, aliada a crescente democratização do acesso à internet, tem provocado o aumento da demanda por baterias recarregáveis de Polímero de Lítio (Li-Po) (Susarla and Ahmed, 2019). Entretanto, estas baterias possuem capacidade finita para o armazenamento de energia, sendo necessária a recarga após determinado período de uso, por meio de uma fonte externa (Plett, 2015). A operabilidade destes dispositivos está diretamente relacionada à quantidade de energia armazenada, e a mobilidade que está restrita ao tempo de vida da bateria (Yang et al., 2019).

Deste modo, torna-se importante a utilização de métodos capazes de prever este tempo de operação (Fransozi et al., 2015). Ao longo dos anos, diferentes modelos matemáticos foram desenvolvidos com esta finalidade, dentre estes destacam-se: os modelos eletroquímicos, os modelos elétricos, os modelos estocásticos, os modelos analíticos, e os modelos híbridos. Existe também a necessidade da aferição da quantidade de energia restante de uma bateria, requerendo instrumentação específica (Ciucci, 2019), o que torna essa implementação inviável em *smartphones*, devido as restrições de espaço e recursos (Freitas, 2021). Nesse sentido, vários estudos têm avançado em estratégias baseadas na modelagem matemática aplicada à predição do estado de carga¹ (SOC) das baterias (Freitas, 2021).

Durante o processo de modelagem matemática do tempo de vida ou da quantidade de energia restante de baterias, existem etapas que devem ser seguidas, tais como: experimentação, abstração (i.e., construção do modelo), resolução, e validação (Bassanezi, 2010). Na etapa de construção do modelo, assim como de validação, é necessário um conjunto de dados, obtidos através de experimentos físicos de um sistema real ou de uma planta experimental. Observa-se que esses dados são utilizados para ambos, determinação dos parâmetros empíricos do modelo, e para fins de comparação dos resultados simulados pelo modelo com os resultados obtidos experimentalmente (Viera and Sausen, 2019; Alvarado, 2017).

Portanto, a obtenção de dados experimentais é uma importante etapa da modelagem matemática (Leseux et al., 2019), sobretudo, para a estruturação de modelos com abordagem empírico-analítica (Freitas, 2021). Neste contexto, é notória a necessidade de uma metodologia para os ensaios controlados de baterias, onde estas possam ser expostas a diferentes condições de testes, sejam de curta ou de longa duração, para ajudar na construção de modelos matemáticos acurados e robustos, assim como, para que seja possível avaliar como uma bateria se comporta quando exposta a diversos ciclos de maneira repetitiva.

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é apresentar um *Testbed* especialmente desenvolvido para dar suporte a construção e validação de modelos matemáticos que descrevem o tempo de vida e o tempo restante de baterias. Ao mesmo tempo que é proposta uma metodologia

para realização dos ensaios controlados de longa duração em baterias do tipo Li-Po. De forma a automatizar o processo de carga e descarga destas, armazenando os dados relevantes do processo.

2. PLATAFORMA DE TESTES

Para a realização dos ensaios controlados, foi desenvolvida uma plataforma de testes de baterias, no Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC), da UNIJUÍ, apresentada na Figura 1. Este grupo realiza pesquisas relacionadas a baterias a mais de 10 anos, contando com uma equipe técnica de pesquisadores e estudantes com formação em diferentes áreas da engenharia, computação e matemática (Freitas, 2021).

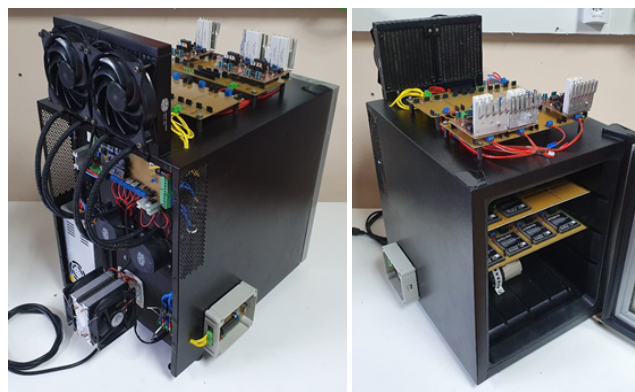


Figura 1. Plataforma de testes de baterias.

Esta plataforma foi desenvolvida para controlar, de forma automática e autônoma, o processo de carga e descarga das baterias, e a temperatura em que as baterias estão expostas durante os ensaios. O *Testbed* possibilita controlar todas estas variáveis e armazená-las em uma base de dados para que, posteriormente, seja realizada uma análise mais detalhada das mesmas. Também foi desenvolvido um sistema de proteção para as baterias, onde elas são desconectadas do processo imediatamente, caso aconteça alguma irregularidade.

A plataforma desenvolvida opera com até 8 baterias simultaneamente. Cada bateria pode ser configurada para um ensaio de modo independente, mas uma mesma configuração também pode ser aplicada a grupos predefinidos de baterias. A capacidade máxima de carga e descarga é de 10 W, sendo que, a faixa de tensão operacional no processo de carga é de 0 a 8 V.

Como o sistema possui uma grande quantidade de requisitos, ele foi desenvolvido de maneira modular, possuindo cinco módulos: o sistema supervisor, a interface USB/I²C, o sistema de controle de temperatura, o sistema de controle de carga e descarga, e a placa de circuito impresso (PCI) de suporte para as baterias.

Nas próximas seções estes módulos serão detalhados. Primeiramente será abordado o funcionamento do sistema supervisor, na sequência o controle de carga e descarga. E por fim, será abordado o controle de temperatura implementado na plataforma.

* Trabalho com suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

¹ Do inglês, *State of Charge*.

2.1 Supervisório

O sistema supervisório é responsável por realizar a interface entre o usuário e a plataforma de testes. Realiza a aquisição e o armazenamento de dados dos ensaios executados na plataforma, bem como, envia as configurações necessárias para cada parte do sistema operar corretamente, conforme a configuração realizada pelo usuário.

Como a plataforma é composta de vários sistemas, foi desenvolvida uma placa Master que a partir do sistema supervisório unifica e controla todas as operações da plataforma. Deste modo, o supervisório realiza solicitações a PCI master I²C/USB, que realiza a comunicação com as demais partes do sistema, conforme apresentado no Fluxograma na Figura 2. Já a placa Master de comunicação pode ser observada na Figura 3, através dela que a plataforma é conectada com o computador do usuário.

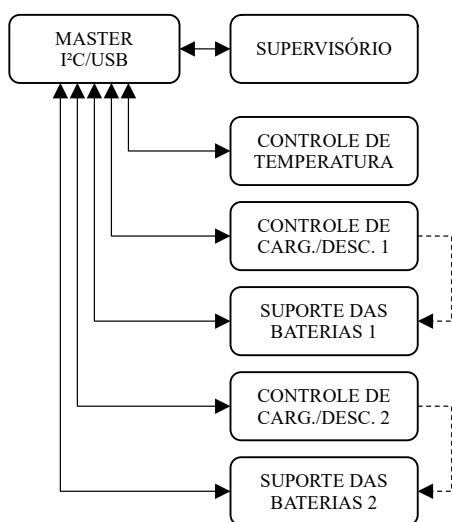


Figura 2. Fluxograma de dados entre as PCIs da plataforma de testes.

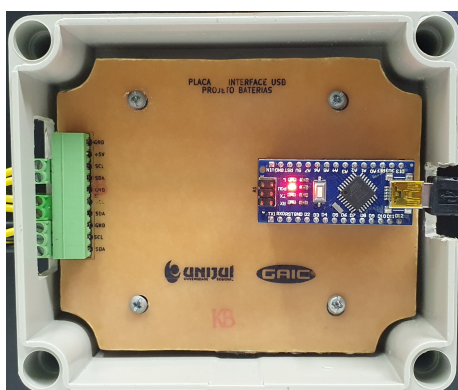


Figura 3. PCI de comunicação Master I²C/USB.

Em relação a comunicação é utilizado o padrão RS232 entre o supervisório e a placa Master I²C/USB. Esse protocolo de comunicação é muito popular para estabelecer transmissão de dados em médias distâncias. Já para a comunicação da placa Master com os demais sistemas é realizada a partir do método I²C, indicado para interconexão entre periféricos de baixa velocidade. Que neste projeto

possibilitou unificar toda a comunicação em um único barramento de interface, sem a necessidade de gerenciar múltiplos canais, facilitando o processo de montagem e manutenção da plataforma.

2.2 Controle de Carga e Descarga

Durante o processo de carga das baterias, é desejável uma baixa variação residual de tensão e corrente em regime permanente (Viera and Sausen, 2019). Ainda, a plataforma deve conseguir carregar as baterias com uma corrente elétrica adaptativa durante o processo, necessitando que o conversor utilizado tenha uma resposta relativamente rápida (Viera and Sausen, 2019). Diante destes requisitos, optou-se por utilizar um conversor do tipo buck síncrono.

Já para o processo de descarga foi utilizado um transistor e dois resistores que formam uma carga de 0,9 Ω . Quando o processo de descarga é acionado pelo supervisório, a bateria é conectada nesta carga, e então sua energia é drenada. Sensores de tensão e corrente, foram utilizados para monitorar todo o processo de carga e descarga, armazenando essas informações em logs do sistema.

Outro requisito de projeto adotado foi a modularidade, para facilitar o processo de manutenção. Assim, cada bateria possui seu próprio módulo de carga e descarga como mostrado na Figura 4. Na ocorrência de uma falha em apenas uma bateria, esta pode ser substituída rapidamente, sem influenciar na simulação das demais, aumentando a confiabilidade dos ensaios realizados.

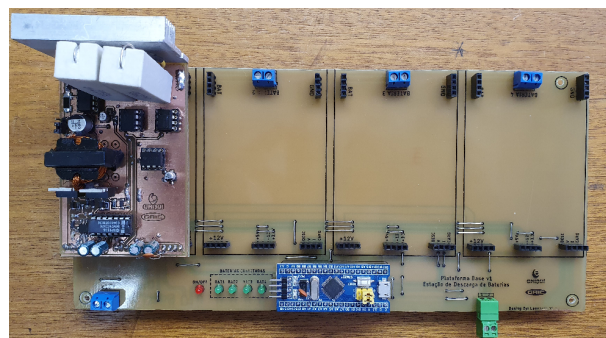


Figura 4. Módulo individual de carga e descarga, conectado a plataforma de controle.

Para realizar o controle do processo de carga e descarga de cada bateria, foi utilizado um controlador PID, que possui importantes características de robustez, precisão e facilidade de implementação (Viera and Sausen, 2019). Para implementar o controle, foi usado o microcontrolador STM32F103C8T6, que possui até 15 canais PWM, 10 canais ADC e opera a 72 MHz (ST, 2021). Utilizando este dispositivo, foi possível controlar 4 módulos de carga e descarga utilizando apenas um microcontrolador.

2.3 Controle de Temperatura

Baterias são constituídas pela associação de múltiplas células, de modo que é realizado o aproveitamento da energia química em energia elétrica, assim como o processo recíproco (Amado, 2015). Nesse contexto, as baterias são classificadas pela questão energética e de potência disponível. Os parâmetros de eficiência, vida útil, temperatura de

funcionamento, auto-descarga e densidade energética são de significativa importância (Divya and Østergaard, 2009).

A temperatura de operação é um indicativo que acompanha diversos dispositivos, a elevação térmica não controlada corretamente é capaz de ocasionar, a longo prazo, perda de vida útil deste dispositivo. Para baterias, isso não é diferente, onde a temperatura é um dos maiores fatores para determinação da longevidade de uma bateria (Silveira, 2020). Para contextualizar as implicações disso, tal problemática, quanto a questão térmica, resulta em um dos grandes desafios atuais aplicados ao cenário dos veículos elétrico (Al-Zareer et al., 2018). Além de que a eficiência da bateria é reduzida, na medida em que aumentam as perdas energéticas de forma proporcional a elevação térmica.

Estudos recentes demonstram que para obter uma boa longevidade, as baterias devem operar entre 20 °C e 40 °C (Silveira, 2020). Por conta disso, define-se a necessidade de um controle térmico das rotinas de ensaio das baterias. Sendo que o sistema deve ser dotado da capacidade de manter a faixa térmica dentro de uma faixa pré-definida pelo usuário do *Testbed*, tanto protegendo a bateria, como possibilitando elevar a faixa de temperatura, visando validar o modelo em condições extremas e controladas.

Para contemplar essa possibilidade foi desenvolvido um *firmware* associado a um hardware eletrônico capaz de ler a temperatura interna da plataforma e atuar sobre ela, tanto no sentido de manter a temperatura dentro da faixa ideal, quanto de promover a elevação térmica. Foi utilizado o módulo MAX6675 com termopar do tipo K, que é um sensor robusto e que apresenta relativa imunidade a ruído, o que é uma característica importante dentro de uma plataforma dotada de múltiplos sistemas interligados. Foram utilizados 4 sensores, de modo a obter uma média térmica do interior da plataforma onde as baterias são alocadas.

Para o resfriamento, optou-se por utilizar 3 pastilhas peltier TEC1-12706, as quais são baseadas no efeito Peltier, conectadas em paralelo. Tal efeito é oriundo dos estudos de Thomas Johann Seebeck, que em 1821, observou o efeito termoelétrico, ou seja, a conversão direta da diferença de temperatura em tensão elétrica e vice-versa (Seebeck, 1895). Nesse contexto, as pastilhas de peltier possibilitam resfriar uma extremidade ao mesmo tempo que aquecem a outra mediante aplicação de tensão (Moura and Almeida, 2014). Devido a existência dessa relação, no lado que sofre aquecimento é necessário o uso de um dissipador térmico, para drenar o calor gerado e em auxílio desse fez-se uso de dois *water cooler* e de um *air cooler*, isso em razão da baixa condutividade térmica do ar atmosférico. Já como mecanismo para exercer o acionamento desses atuadores recorreu-se a relés. Para realizar o aquecimento, fez-se uso de uma resistência e de um *cooler*, o último para distribuir o calor de forma mais homogênea possível dentro da câmara onde as baterias são posicionadas para os ensaios.

No que tange a metodologia de controle optou-se pelo uso do método ON/OFF. Devido a facilidade de implementação, tanto no que se refere ao *firmware* como na adoção de um hardware simples, com menor necessidade de componentes. Assim, facilita-se a elaboração da PCI, mostrada na Figura 5, que possui as dimensões limitadas pela estrutura da plataforma e dos demais sistemas.

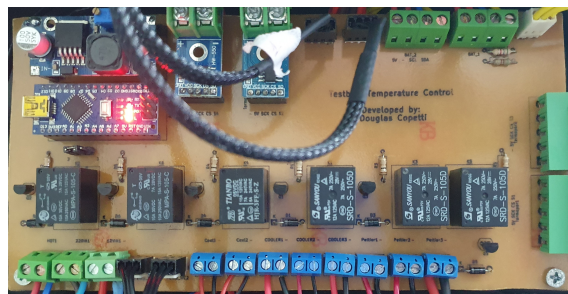


Figura 5. PCI de controle do sistema de temperatura.

A partir desta PCI foi possível estabelecer as conexões elétricas necessárias entre os dispositivos utilizados, de forma robusta e prática. Sendo assim, uniu-se a unidade de controle, no caso um atmega328p, aos sensores de temperatura utilizados, bem como ao controle dos relés, que promovem a interface com os sistemas de aquecimento e de resfriamento, efetuando ainda, as conexões de comunicação com a placa de controle de dados.

3. BATERIA UTILIZADA

Nos últimos anos, a tecnologia de baterias de íons de Lítio, tradicionalmente usada em *smartphones*, começou a ser substituída por baterias de Li-Po, que são fabricadas com eletrólito flexível a base de sais de Lítio retidos em polietileno (Pillai, 2019). Para os ensaios experimentais apresentados neste artigo, foi utilizada a bateria de Li-Po PL-383562-2C, apresentada na Figura 6. Esta bateria possui capacidade de 850 mAh e foi utilizada em diversos modelos de *smartphones* de entrada (Freitas, 2021). As principais características deste modelo são mostradas na Tabela 1 (Corp, 2022; AAPP, 2022).



Figura 6. Bateria utilizada nos ensaios.

Tabela 1. Principais informações da bateria utilizada nos ensaios (PL-383562-2C).

Item	Valor
Capacidade Mínima	850 mAh
Tensão Nominal	3,70 V
Tensão de Descarga (<i>Cut-off</i>)	3,00 V
Tensão de Carga	4,20 V
Máxima Tensão de Carga	4,23 V
Máxima Corrente de Carga	1275 mA
Máxima Corrente de Descarga	1700 mA
Temperatura de Carga	0 a 45 °C
Temperatura de Descarga	-20 a 60 °C

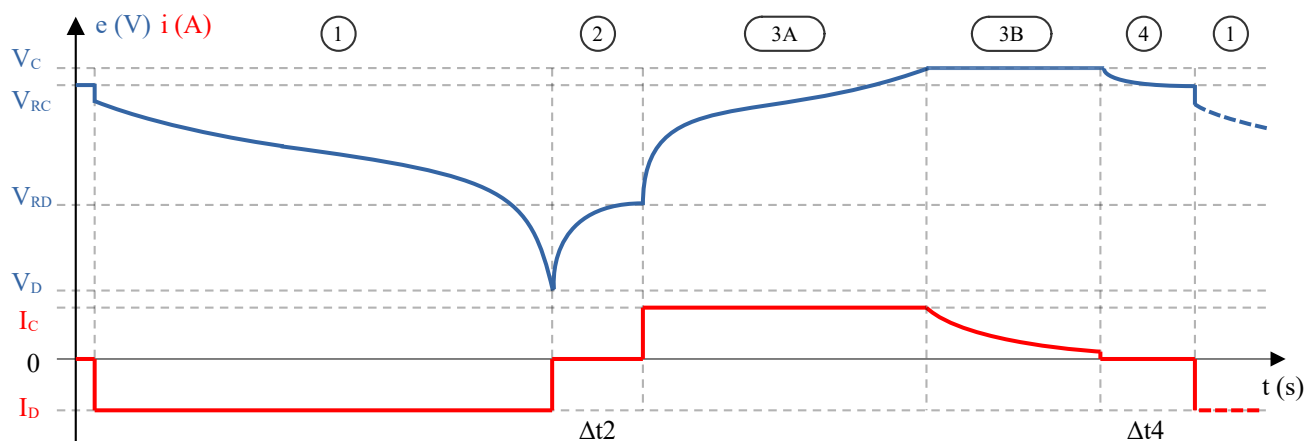


Figura 7. Comportamento real durante o processo de carga e descarga contínuo de uma bateria de Li-Po.

4. METODOLOGIA DE ENSAIOS

Para a realização de ensaios em baterias, é importante conhecer as características da mesma, uma vez que existem diferenças estruturais entre as várias tecnologias (Reddy, 2011), que em maior ou menor grau, influenciam na resposta dinâmica da bateria, impactando diretamente, por exemplo, no SOC e no seu tempo de vida (Ciucci, 2019). As características de uma bateria, podem ser classificadas em estáticas e dinâmicas (Freitas, 2021). Para a bateria de Li-Po que será utilizada nos ensaios, as características estáticas já foram apresentadas na Tabela 1. Estas características são praticamente invariantes ao longo do tempo, ao contrário das características dinâmicas, que são afetadas por efeitos não lineares (Buchmann, 2001; Tarkoma et al., 2014).

O SOC, a resistência interna, a saúde da bateria, a tensão de circuito aberto e a tensão de saída, são características dinâmicas das baterias. É importante salientar que essas são variáveis relevantes para a construção de modelos matemáticos confiáveis de baterias. Há também o efeito de recuperação, o efeito de depleção, a taxa de capacidade e a temperatura, que são efeitos não lineares presentes durante o processo de carga e descarga (Freitas, 2021). Estas características ainda podem ser afetadas pelo perfil de descarga de corrente imposto a bateria, o que é um fator importante no controle preditivo do tempo de vida, e nesse sentido, da operacionalidade de um sistema.

Na Figura 7 é apresentado o comportamento de uma bateria de Li-Po durante o processo de carga e descarga contínuo. É importante compreender esse comportamento, para que seja possível automatizar e realizar ensaios de longa duração utilizando uma plataforma de testes. Analisando a Figura 7 é possível observar as quatro etapas em que a bateria está exposta durante a execução dos ensaios de carga e descarga contínua. Sendo cada período definido por:

- (1) Processo de descarga da bateria;
- (2) Tempo entre descarga e carga;
- (3) Processo de carga da bateria;
- (4) Tempo entre carga e descarga.

No período 1, a bateria fornece energia para uma carga em um circuito externo, na Figura 7, é mostrado que a carga

extrai energia de forma contínua da bateria, ou seja, a corrente elétrica de descarga (I_D) é constante. Entretanto, dependendo da carga, ela também pode ser variável, ainda mais se for considerado o consumo de energia em um *smartphone* (Freitas, 2021). Durante esta etapa, a tensão da bateria que estava em níveis de recuperação pós carga (V_{RC}) ou também chamada de tensão de flutuação (COSTA et al., 2019), diminui até chegar ao ponto de corte de descarga (*Cut-off*), que é o valor definido como limite mínimo de tensão elétrica, onde a bateria ainda pode fornecer energia, sem afetar sua integridade. Do ponto de vista operacional, ao atingir esse valor a bateria é considerada completamente descarregada. Tal valor é informado pelo fabricante no *datasheet* do dispositivo.

O período 2 ocorre quando não é fornecida e nem extraída energia da bateria, conforme mostrado na Figura 7. Nesse momento, a tensão da bateria começa a aumentar até atingir um nível de recuperação pós descarga (V_{RD}). Isto ocorre devido ao efeito de recuperação da bateria, pois quando a bateria fornece uma corrente elétrica a uma carga, ocorre a formação de um gradiente de espécies eletroativas no eletrólito, o que reduz o SOC e a tensão da bateria. Porém, quando a bateria entra em repouso, a difusão de elétrons diminui o gradiente de concentração, recuperando parte do SOC e da tensão da bateria (Freitas, 2021). Para determinar quando esse processo acaba, foi considerado o tempo indicado pelo fabricante para o repouso da bateria entre o processo de carga e descarga, e vice versa. Para esta bateria, o fabricante indica um tempo de 30 minutos (Corp, 2022; AAPP, 2022). Somente após o período de repouso terminar é iniciado o período 3, onde é fornecida energia para carregar a bateria.

Existem dois principais métodos para carregar baterias de Li-Po, o método de tensão constante, que é mais simples, e o método de corrente constante/tensão constante² (CC/CV), que é o método mais aplicado a este tipo de bateria (COSTA et al., 2019; Possa and Passold, 2006) e portanto adotado neste trabalho. Na Figura 7, a etapa de corrente de carga constante (I_C) é referenciada como período 3A, enquanto a etapa de tensão de carga constante (V_C) é referenciada como período 3B. Quando a corrente

² Do inglês, *Constant Current/Constant Voltage*

de carga atinge um valor inferior a 2% de C^3 , neste ponto a bateria é considerada carregada (COSTA et al., 2019; Possa and Passold, 2006).

Em seguida, inicia-se o último período denominado de 4, onde a bateria entra novamente em repouso, não fornecendo e nem recebendo corrente elétrica. A tensão da bateria diminui gradativamente até o valor de tensão de recuperação pós carga (V_{RC}), também chamada de tensão de flutuação (COSTA et al., 2019). Como mencionado anteriormente, o tempo de repouso é sugerido pelo fabricante, assim como ocorre para a segunda etapa.

Após finalizadas todas essas etapas, novamente se iniciaria o primeiro período, e então a bateria estaria condicionada a um ciclo periódico de ensaios sucessivos. É importante ressaltar que, por mais que neste trabalho o ciclo iniciou-se pela descarga da bateria. O processo de automatização de ensaio de longa duração, poderia começar pela etapa de carregamento, sem nenhum problema.

Para que o sistema possa interpretar todo este processo, é notória a necessidade de sensores que consigam medir o fluxo de corrente e tensão elétrica nos terminais da bateria. Além de monitorar o tempo, para os períodos de repouso (2) e (4). Outra variável importante é a temperatura da bateria, pois esta pode provocar alterações na resistência interna da bateria, acarretando em um impacto sobre a capacidade efetiva, a tensão de saída e a taxa de auto-descarga.

Por fim, é importante ressaltar que, a plataforma de testes possui capacidade de coletar 1 amostra por segundo, taxa que foi utilizada durante os ensaios. Isto não afeta os testes, pois é uma taxa de amostragem próxima de um cenário realista, onde esta taxa de amostragem, é uma quantidade suficiente para descrever o comportamento da bateria durante os ensaios. Quanto as demais variáveis discutidas nesta seção e que foram mostradas na Figura 7, foram definidos os valores mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores adotados para os ensaios da bateria de Li-Po.

Variável	Valor
V_C	4,20 V
V_D	3,00 V
I_C	200 mA
I_D	Variável
Δt_2	10 min.
Δt_4	10 min.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como o foco do trabalho é a obtenção de dados para construção de modelos para predição do tempo de vida de baterias de Li-Po. Somente serão avaliados os resultados pertinentes ao processo de descarga das mesmas. Nesse sentido, a plataforma foi configurada de forma a apenas armazenar dados durante esta etapa, mas nada impede que a partir de pequenas alterações a plataforma possa armazenar também os dados de carga.

Para verificar o funcionamento da plataforma, foram realizados vários ensaios com baterias, sempre utilizando 8 C^3 se refere a capacidade nominal da bateria, neste caso 1 C equivale 850 mAh, conforme mostrado na Tabela 1.

baterias simultaneamente (limite da plataforma), as quais foram identificadas de B1 a B8. Primeiramente foi realizado um ensaio curto de corrente constante, onde as baterias foram divididas em dois grupos de 4, o primeiro grupo (B1 a B4) foram ensaiadas com uma corrente de descarga de 400 mA, enquanto o segundo grupo (B5 a B8), foram ensaiadas com uma corrente de 800 mA, conforme apresentado na Figura 8. Onde é possível observar que com o aumento da corrente de descarga, ocorre a diminuição do tempo de vida da bateria. Tal processo não é linear, isso se deve ao efeito da taxa de capacidade (Freitas, 2021).

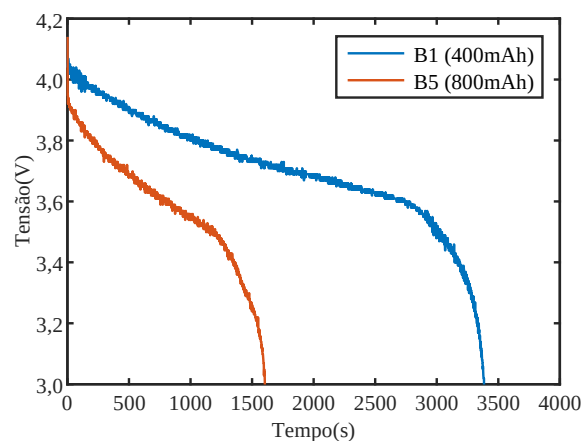


Figura 8. Comportamento da tensão da bateria, para diferentes correntes de descarga constante.

Outro ensaio curto realizado foi o de corrente variável, neste foi aplicada uma corrente de 200 mA durante 320 segundos, depois 400 mA durante 160 segundos e ainda 600 mA durante 30 segundos, a todas as baterias, repetindo periodicamente até que cada bateria descarregasse, conforme apresentado na Figura 9.

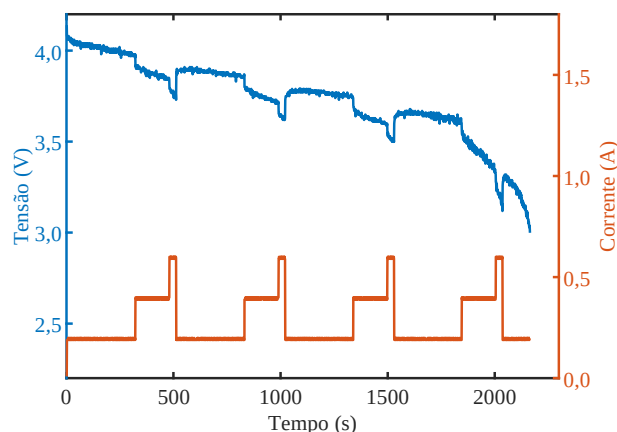


Figura 9. Comportamento da tensão da bateria, com corrente de descarga variável.

Analisando as Figuras 8 e 9 é possível observar que quanto maior o nível de corrente de descarga, menor é a tensão da bateria. Entretanto, ela se recupera quando um nível menor de corrente é exigido da bateria. Deste modo, é possível observar, de forma mais clara, os efeitos não lineares presentes no processo de descarga de baterias.

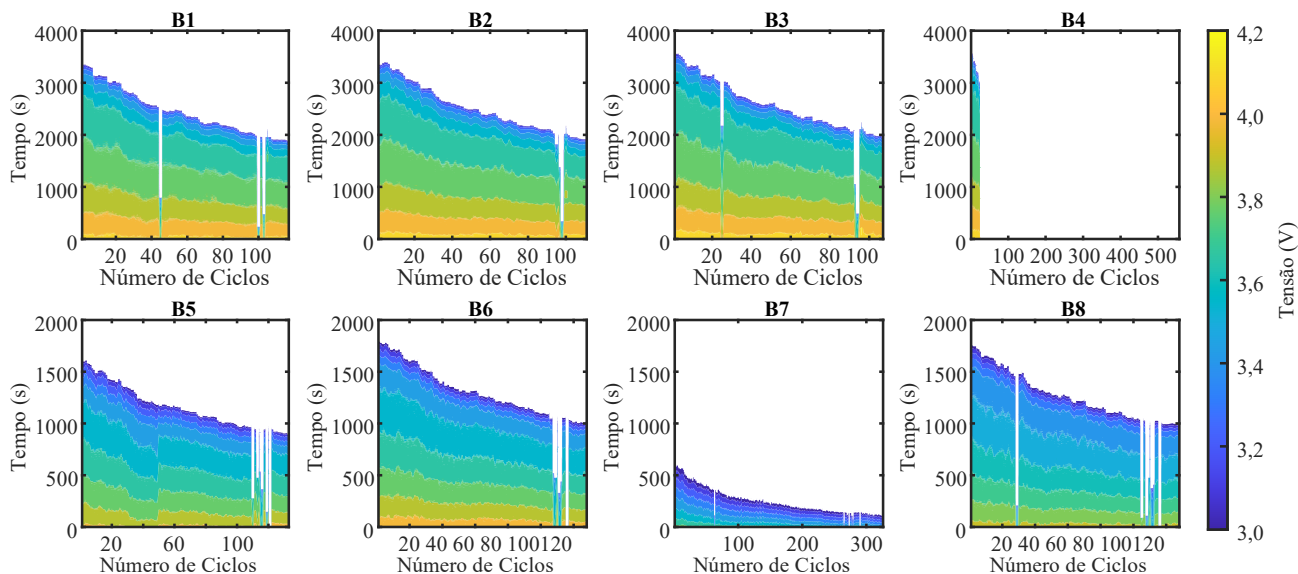


Figura 10. Comportamento da tensão e tempo de vida das baterias, ao longo dos ciclos de carga e descarga.

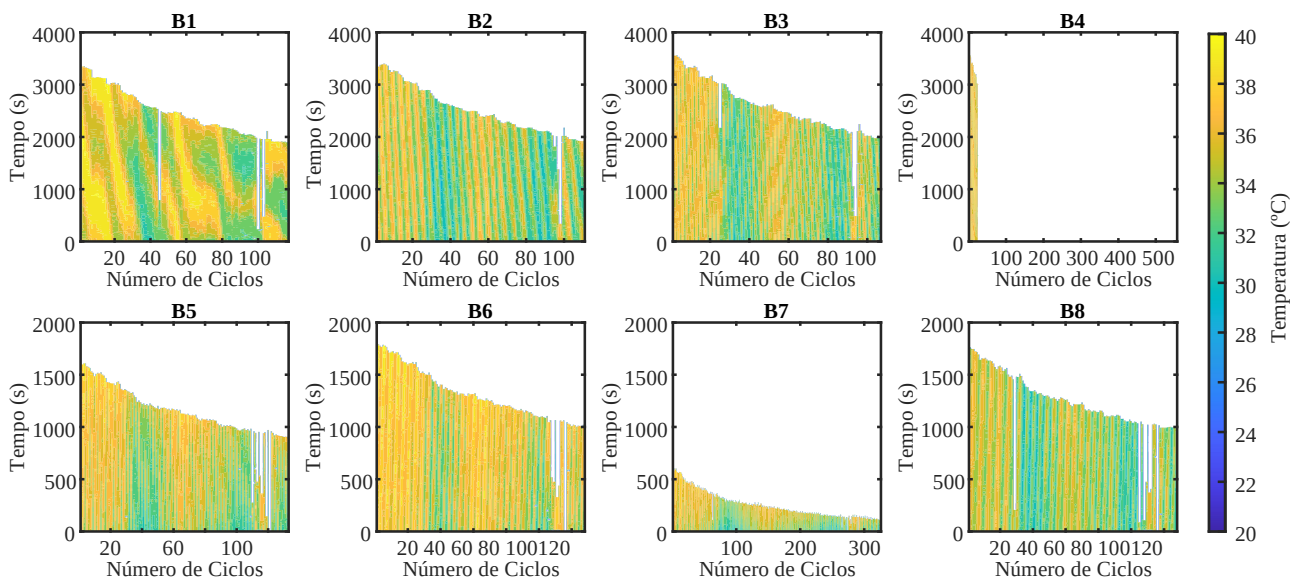


Figura 11. Comportamento da temperatura das baterias, ao longo dos ciclos de carga e descarga.

Após estes ensaios de curta duração, foi realizado um ensaio de longa duração, onde foram utilizadas as mesmas configurações de carregamento e tempo de repouso da bateria, que foram mostrados anteriormente na Tabela 2. Optou-se por um ensaio com corrente constante durante a descarga, utilizando a mesma metodologia descrita anteriormente, com dois grupos de 4 baterias, com corrente de descarga de 400 mA e 800 mA. Os resultados deste ensaio, para a tensão da bateria, são apresentados na Figura 10.

Ao longo dos ciclos, pode-se observar que o tempo de vida das baterias diminuiu consideravelmente, e que os níveis de tensão seguem o mesmo comportamento, com o incremento dos ciclos diminuiu o tempo específico para alcançar determinado nível de tensão da bateria. Observa-se que os resultados foram comprometidos em duas baterias, na B4 ocorreu algum problema no armazenamento dos dados e/ou até mesmo de conexão da bateria, por apresentar tais

resultados. A bateria B7, já iniciou os testes com o tempo de vida muito reduzido, o que pode ter ocorrido devido aos pré-ensaios, ou ainda relacionado a algum defeito construtivo desta bateria. Entretanto, isso foi um erro isolado e não afetou os resultados das demais baterias.

Como dito anteriormente, outra variável importante é a temperatura que a bateria é exposta durante o processo. Nesse sentido, o sistema de controle de temperatura projetado mostrou-se capaz de manter o nível térmico dentro da faixa alvo estabelecida, ou seja, entre 20 °C e 40 °C, durante os ensaios com as baterias. Isto é apresentado na Figura 11, mostrando a temperatura em relação a tensão da bateria e o número de ciclos da mesma.

Em relação ao resfriamento, a plataforma apresentou capacidade de atingir temperaturas ainda inferiores, mas apenas quando as baterias não estavam sofrendo carga ou descarga, em decorrência do calor liberado durante o pro-

cesso em um ambiente hermeticamente isolado. Todavia, o sistema é perfeitamente capaz de manter a temperatura definida por longos períodos mesmo com todas as baterias em estado ativo.

O sistema de temperatura é dotado da capacidade de aquecer o ambiente, atingindo com facilidade temperaturas superiores a 80 °C em um curto período. É possível atingir temperaturas mais elevadas, mas isso implicaria em danos a plataforma, dado o material que a mesma foi construída. Dessa forma, pode-se por meio da plataforma tanto realizar ensaios dentro da faixa térmica ideal quanto adicionar um contexto de estresse relacionado a alta temperatura, isso de modo a possibilitar a observação do impacto causado pela problemática térmica a vida útil e a eficiência das baterias.

6. CONCLUSÃO

A partir dos dados apresentados no transcrito do trabalho é possível afirmar que tanto o desenvolvimento da plataforma de teste de baterias, aqui denominada de *Testbed* obteve sucesso como a aplicação da metodologia proposta para realizar os ensaios, e também para realizar uma série de etapas que permitem a repetição do processo de carga e descarga e a correta análise dos dados.

O *Testbed* já está completamente funcional e a metodologia aqui apresentada já foi usada em vários ensaios que disponibilizaram um rico e vasto conjunto de dados utilizados por pesquisadores para validar modelos matemáticos e computacionais aplicados ou mesmo desenvolvidos para a atividade de predição do tempo de vida de dispositivos móveis equipados com baterias de Li-Po.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento CNPq e FAPERGS pelas bolsas de pesquisa concedidas, ao GAIC e a UNIJUÍ pela disponibilização dos laboratórios para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AAPP (2022). Polymer lithium ion battery specifications. URL <https://www.batteryspace.com/prod-specs/p1383562.pdf>.
- Al-Zareer, M., Dincer, I., and Rosen, M.A. (2018). A review of novel thermal management systems for batteries. *International Journal of Energy Research*, 42(10), 3182–3205.
- Alvarado, C.S.M. (2017). *Estudo e implementação de métodos de validação de modelos matemáticos aplicados no desenvolvimento de sistemas de controle de processos industriais*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Amado, K.S.Q.L. (2015). *Análise do efeito de implementação de armazenamento térmico em banco de gelo e armazenamento elétrico em baterias Sódio-Enxofre (NaS) sobre o custo de exploração de edifícios de serviços*. Ph.D. thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Bassanezi, R.C. (2010). *Ensino Aprendizagem com Modelagem Matemática*. 1. Editora Contexto.
- Buchmann, I. (2001). Batteries in a portable world: a handbook on rechargeable batteries for non-engineers. Ciucci, F. (2019). Modeling electrochemical impedance spectroscopy. *Current Opinion in Electrochemistry*, 13, 132–139.
- Corp, A.P.P. (2022). Polymer li-ion cell: 3.7v 800mah (383562-2c, 2.96wh, 1.6a rate) - un38.3 passed -. URL <https://bityli.com/HtTMIF>.
- COSTA, P.F., LÖBLER, P.H., ROGGIA, L., and SCHUCH, L. (2019). Controle de corrente e tensão do conversor dab modificado aplicado à carga de baterias. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*.
- Divya, K. and Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems—an overview. *Electric power systems research*, 79(4), 511–520.
- Fransozi, L., Sausen, A., and Sausen, P.S. (2015). Desenvolvimento de um modelo híbrido de baterias. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, 3(1).
- Freitas, D.J.B. (2021). Desenvolvimento de um modelo analítico aplicado ao problema de predição do estado de carga de baterias.
- Lesoux, A., Sausen, A.T.Z.R., and Sausen, P.S. (2019). Modelagem matemática dos ciclos de vida de baterias li-po para dispositivos móveis: Uma revisão. *Salão do Conhecimento*.
- Moura, P.R.d. and Almeida, D. (2014). Refrigerador termoelétrico de peltier usado para estabilizar um feixe laser em experimentos didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36.
- Pillai, V.K. (2019). Lithium-ion batteries: A machine-generated summary of current research. *Current Science*, 117(3), 521–523.
- Plett, G. (2015). *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*.
- Possa, P.R. and Passold, F. (2006). Recarregador inteligente de baterias.
- Reddy, T.B. (2011). *Linden's handbook of batteries*. McGraw-Hill Education.
- Seebeck, T.J. (1895). *Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperatur-differenz*. 70. W. Engelmann.
- Silveira, F.G.d. (2020). *Gestão térmica em baterias de tração de veículos elétricos*. Ph.D. thesis.
- ST (2021). Datasheet stm32f103x8 and stm32f103xb.
- Susarla, N. and Ahmed, S. (2019). Estimating cost and energy demand in producing lithium hexafluorophosphate for li-ion battery electrolyte. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(9), 3754–3766. doi: 10.1021/acs.iecr.8b03752. URL <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03752>.
- Tarkoma, S., Siekkinen, M., Lagerspetz, E., and Xiao, Y. (2014). *Smartphone energy consumption: modeling and optimization*. Cambridge University Press.
- Viera, L.A.B. and Sausen, P.S. (2019). Controlador de carga de baterias com conversor buck síncrono para utilização na validação de modelos matemáticos.
- Yang, F., Song, X., Dong, G., and Tsui, K.L. (2019). A coulombic efficiency-based model for prognostics and health estimation of lithium-ion batteries. *Energy*, 171, 1173–1182.