

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

REGIS GROTTO RIGO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DO ESTADO DE
CARGA DE BATERIAS PARA USO EM DRONES**

**BENTO GONÇALVES
2022**

REGIS GROTTO RIGO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DO ESTADO DE
CARGA DE BATERIAS PARA USO EM DRONES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica à
Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. André Bernardes Michel

BENTO GONÇALVES
2022

REGIS GROTTO RIGO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DO ESTADO
DE CARGA DE BATERIAS PARA USO EM DRONES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica à
Universidade de Caxias do Sul.

Banca Examinadora:

Prof. Me. André Bernardes Michel (orientador)
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Cicero Zanoni
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Bruno Fensterseifer Dias
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Uma das principais limitações dos drones elétricos disponíveis comercialmente na atualidade é a baixa autonomia de voo. Como a simples adição de um grande número de células de bateria não é uma opção em uma aplicação onde o baixo peso é fundamental, e considerando que a densidade energética das baterias disponíveis aumentou pouco nos últimos anos, os esforços têm sido concentrados na otimização do uso da energia disponível, sendo o monitoramento da bateria uma das maneiras de se atingir esse objetivo. Nesse contexto, a determinação precisa do estado de carga da bateria é essencial, pois permite estender a autonomia de voo da aeronave sem recorrer a baterias maiores e/ou de maior custo, já que possibilita extrair a máxima capacidade de descarga disponível sem o risco de danos. Nesse trabalho, foi desenvolvido um sistema de gerenciamento que visou integrar *hardware* e *software* de modo a ser capaz de informar em tempo real o estado de carga de uma bateria Li-Ion, bem como estimar o tempo de operação restante com nível de precisão similar a métodos de maior complexidade, como os que utilizam aprendizagem de máquina, mas com baixa demanda computacional, utilizando-se como base o método de contagem de Coulomb, que tem como princípio o monitoramento da corrente ao longo do tempo, mas incrementando-o com medições de tensão e temperatura, além de uma pequena sequência de ensaios de descarga para aquisição de dados de caracterização da bateria. Testes de descarga com corrente constante resultaram em um erro médio de 1,51% nas estimativas de estado de carga, enquanto nos ensaios com corrente variável se obteve um erro médio de 4,05%. Ensaios realizados com a bateria carregada parcialmente e com descarga em corrente constante resultaram em um erro médio de 1,95%.

Palavras-chave: Drones. Estado de carga. Bateria. Autonomia de voo.

ABSTRACT

One of the main limitations of today's commercially available electric drones is the low flight range. As the simple addition of a large number of battery cells is not an option in an application where low weight is critical, and considering that the energy density of the available batteries has barely increased in recent years, efforts have been focused on optimizing the use of the available energy, and battery monitoring is one of the ways to achieve this goal. In this context, the precise determination of the battery state of charge is essential, as it allows extending the aircraft's flight autonomy without resorting to larger and/or more expensive batteries, since it allows to extract the maximum available discharge capacity without the risk of damage. In this work, was developed a monitoring system that integrates hardware and software in order to be able to report in real time the state of charge of a Li-Ion battery, as well as estimate the remaining operating time, using the Coulomb counting method, which has as its principle the monitoring of current over time, incremented with voltage and temperature measurements, in addition to a small sequence of discharge tests meant to obtain data for the characterization of the battery, aiming to achieve a level of precision similar to more complex methods, such as those using machine learning, but with low computational demand. Constant current discharge tests resulted in an average error of 1.51% in the state of charge estimations, while the variable current tests returned an average error of 4.05%. Tests performed with the battery partially charged and with constant current discharge resulted in an average error of 1.95%.

Keywords: Drones. State of Charge. Battery. Flight time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo tradicional de multirrotor, composto de quatro motores.....	22
Figura 2 – Drone de asa fixa para aplicações militares	22
Figura 3 – Impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga de uma bateria Li-Ion 18650 C/LiCoO ₂	24
Figura 4 – Impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga de uma bateria Li-Po C/LiMn ₂ O ₄	25
Figura 5 – Impacto da temperatura na capacidade de descarga de baterias Li-Ion.....	26
Figura 6 – Impacto da temperatura na capacidade de descarga de uma bateria Li-Ion IHR18650B.....	27
Figura 7 – Impacto da temperatura na capacidade de descarga de baterias Li-Po C/LiCoO ₂ ..	28
Figura 8 – Impacto do n° de ciclos de carga e taxa de descarga na capacidade de descarga de uma bateria Li-Ion	29
Figura 9 – Impacto do n° de ciclos de carga na capacidade de descarga de baterias Li-Po	29
Figura 10 – Painel do medidor de SOC de Heyer, de 1938.....	32
Figura 11 – Relação entre o SOC e a tensão de circuito aberto em uma bateria LiNiCoMnO ₂	33
Figura 12 – Estrutura de uma rede neural para obtenção do estado de carga de uma bateria ..	36
Figura 13 – Erro do sistema de Cheng Et al. na estimativa do estado de carga	39
Figura 14 – Modelo equivalente da bateria utilizado pelo sistema de Guo e He	39
Figura 15 – Fluxograma do método proposto por Guo e He.....	40
Figura 16 – Fluxograma das atividades realizadas	44
Figura 17 – Comportamento da corrente nos ensaios de corrente variável.....	55
Figura 18 – Diferença nas medições do sensor INA226 (corrente)	60
Figura 19 – Diferença nas medições do sensor LM35 1	61

Figura 20 – Diferença nas medições do sensor LM35 2	61
Figura 21 – Tensão x tempo para diferentes temperaturas com taxa de descarga de 0,25C	62
Figura 22 – Tensão x capacidade de descarga para diferentes temperaturas a 0,25C.....	63
Figura 23 – Tensão x tempo para diferentes taxas de descarga com temperatura de 25°C	65
Figura 24 – Tensão x capacidade de descarga para diferentes taxas de descarga a 25°C	65
Figura 25 – Diferença entre as estimativas e a carga restante real, descargas de 1, 1,4 e 1,8A	72
Figura 26 – Diferença entre as estimativas e o tempo de operação restante real, descargas de 1, 1,4 e 1,8A	73
Figura 27 – Diferença entre as estimativas e a carga restante real, descargas entre 1 e 1,3/1,6/1,9A.....	75
Figura 28 – Diferença entre as estimativas e o tempo de operação restante real, descargas entre 1 e 1,3/1,6/1,9A	76
Figura 29 – Diferença entre as estimativas e a carga restante real, carga parcial de 30 e 50%	78
Figura 30 – Diferença entre as estimativas e o tempo de operação restante real, carga parcial de 30 e 50%	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre diferentes tipos de baterias.....	23
Tabela 2 – Comparativo entre métodos de determinação do SoC de uma bateria	41
Tabela 3 – Especificações técnicas nominais do modelo ICR18650-26F.....	45
Tabela 4 – Especificações técnicas do módulo sensor INA226	46
Tabela 5 – Especificações técnicas do sensor LM35	48
Tabela 6 – Especificações técnicas do Arduino Nano V3.0.....	48
Tabela 7 – Especificações técnicas do elevador de tensão SX1308.....	50
Tabela 8 – Calibração do sensor INA226 (tensão).....	59
Tabela 9 – Resumo dos ensaios de caracterização da bateria em função da temperatura.....	64
Tabela 10 – Resumo dos ensaios de caracterização da bateria em função da taxa de descarga	66
Tabela 11 – Análise de tensão em função da taxa de descarga e percentual de carga restante	67
Tabela 12 – Análise de tensão em função da temperatura e percentual de carga.....	68
Tabela 13 – Análise relativa de tensão em função da temperatura e percentual de carga.....	69
Tabela 14 – Comparativo entre contagem de Coulomb e medição de tensão, descarga de 1A	70
Tabela 15 – Comparativo entre contagem de Coulomb e medição de tensão, descarga de 1,4A	71
Tabela 16 – Comparativo entre contagem de Coulomb e medição de tensão, descarga de 1,8A	71
Tabela 17 – Informações adicionais dos ensaios de carga parcial	73
Tabela 18 – Informações adicionais dos ensaios de corrente variável	77
Tabela 19 – Informações adicionais dos ensaios de carga parcial	79

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Determinação da tensão de circuito aberto, por Christianson e Bourke.....	32
Equação 2 – Estado de carga através do método de contagem de Coulomb.....	34
Equação 3 – Iteração realizada pelo sistema proposto por Guo e He.....	40
Equação 4 – Máxima resistência shunt em função da tensão e corrente.....	47
Equação 5 – Capacidade de descarga em função dos fatores de correção.....	50
Equação 6 – Determinação do FCD.....	51
Equação 7 – Determinação do FCT.....	52
Equação 8 – Erro das estimativas realizadas pelo algoritmo.....	56
Equação 9 – Erro médio das estimativas realizadas pelo algoritmo.....	56
Equação 10 – Corrente circulando pelo sistema.....	57
Equação 11 – Diferença das medições do INA226 em relação ao instrumento calibrado.....	60
Equação 12 – Diferença das medições do LM35 1 em relação ao instrumento calibrado.....	61
Equação 13 – Diferença das medições do LM35 2 em relação ao instrumento calibrado.....	62
Equação 14 – Correção por FCT.....	64
Equação 15 – Correção por FCD até 0,5C.....	66
Equação 16 – Correção por FCD acima de 0,5C e até 0,75C.....	66
Equação 17 – Correção por FCD acima de 0,75C.....	66
Equação 18 – Estimativa de estado de carga em 90% por medição de tensão.....	67
Equação 19 – Estimativa de estado de carga em 80% por medição de tensão.....	67
Equação 20 – Estimativa de estado de carga em 70% por medição de tensão.....	67
Equação 21 – Estimativa de estado de carga em 60% por medição de tensão.....	67
Equação 22 – Estimativa de estado de carga em 50% por medição de tensão.....	67
Equação 23 – Estimativa de estado de carga em 40% por medição de tensão.....	67

Equação 24 – Estimativa de estado de carga em 30% por medição de tensão.....	67
Equação 25 – Estimativa de estado de carga em 20% por medição de tensão.....	68
Equação 26 – Estimativa de estado de carga em 10% por medição de tensão.....	68
Equação 27 – Correção por FCT nas estimativas de estado de carga por tensão.....	69
Equação 28 – Estado de carga inicial para tensões a partir de 3,71V	69
Equação 29 – Estado de carga inicial para tensões abaixo de 3,71V	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ATM	Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo
CASA	Autoridade de Segurança da Aviação Civil
CD	Capacidade de Descarga
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ESC	Controlador de Velocidade Eletrônico
FCD	Fator de Correção de Taxa de Descarga
FCE	Fator de Correção de Envelhecimento
FCT	Fator de Correção de Temperatura
LI-ION	Íon de Lítio
RPA	Aeronave Controlada Remotamente
SGB	Sistema de Gerenciamento de Bateria
SOC	Estado de Carga
SOH	Estado de Saúde
t_r	Tempo de Operação Restante

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
A	Ampere
Ah	Ampere-hora
C	Taxa de descarga
g	Gramma
mAh	Miliampere-hora
n°	Número
V	Volt
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	17
1.2	OBJETIVO GERAL.....	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4	ESCOPO DO TRABALHO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	INTRODUÇÃO AOS DRONES.....	20
2.2	REQUISITOS DA BATERIA PARA APLICAÇÃO EM DRONES	23
2.3	CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DAS BATERIAS.....	24
2.3.1	Taxa de descarga	24
2.3.1.1	Impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga.....	24
2.3.2	Temperatura da bateria.....	25
2.3.2.1	Impacto da temperatura da bateria na capacidade de descarga	26
2.3.3	Número de ciclos de carga	28
2.3.3.1	Impacto do número de ciclos de carga da bateria na capacidade de descarga...28	
2.4	CONCEITOS BÁSICOS PARA PROJETO DE UM SGB	30
2.4.1	Estado de carga (SOC).....	30
2.4.2	Estado de saúde (SOH)	30
2.5	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE CARGA.....	31
2.5.1	Medições de tensão	31
2.5.1.1	Medições de tensão de circuito aberto	32
2.5.1.2	Medições de tensão de carga.....	34
2.5.2	Contagem de Coulomb (método da integração de corrente).....	34
2.5.3	Filtro de Kalman.....	35
2.5.4	Redes neurais	36
2.6	TRABALHOS CORRELATOS	37
2.6.1	Artigo de Kim, Choi, Jeon, Kang e Cha (2020)	37
2.6.2	Artigo de Cheng, Yi, Liang, Song e Liu (2020)	38
2.6.3	Artigo de Guo e He (2020)	39

2.7	COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO SOC.....	41
3	METODOLOGIA.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.1	DEFINIÇÃO DO MODELO DA BATERIA.....	45
3.2	PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS	45
3.2.1	Medição de corrente e tensão	45
3.2.1.1	Determinação do resistor <i>shunt</i>.....	47
3.2.2	Medição de temperatura	47
3.2.3	Microcontrolador.....	48
3.2.4	Carga controlada	49
3.2.5	Elevador de tensão.....	49
3.3	AQUISIÇÃO DOS DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA BATERIA	50
3.3.1	Determinação de <i>CDmax</i>	51
3.3.2	Determinação de <i>FCD</i>.....	51
3.3.3	Determinação de <i>FCT</i>	52
3.3.4	Determinação de <i>FCE</i>	53
3.3.5	Pontos de calibração do algoritmo	53
3.3.6	Transmissão e registro das medições	53
3.3.7	Controle de temperatura do ambiente de realização dos ensaios	54
3.4	IMPLANTAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DE CONTROLE E VALIDAÇÃO DO SGB...	54
3.4.1	Implementação do <i>software</i> de controle	54
3.4.2	Validação do sistema	54
3.5	VALIDAÇÃO DOS SENSORES E FONTES DE ERRO DE MEDIÇÃO	56
3.5.1	Validação dos sensores	56
3.5.2	Fontes de erro de medição de corrente.....	57
3.5.3	Fontes de erro de medição da tensão nos terminais da bateria.....	57
3.5.4	Fontes de erro de medição de temperatura.....	58
4	RESULTADOS	59
4.1	CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	59
4.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA BATERIA	62

4.2.1	Análise do impacto da temperatura na capacidade de descarga	62
4.2.2	Análise do impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga	64
4.2.3	Análise da tensão da bateria em função da taxa de descarga e temperatura	66
4.3	ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA	70
4.3.1	Ensaio de validação do sistema com corrente constante	70
4.3.2	Ensaio de validação do sistema com corrente variável.....	74
4.3.3	Ensaio de validação do sistema com carga parcial	77
5	CONCLUSÕES.....	81
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.2	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A - ESQUEMA ELÉTRICO DO PROTÓTIPO.....	88
	APÊNDICE B - PROTÓTIPO FINALIZADO.....	89
	APÊNDICE C - ALGORITMO	90

1 INTRODUÇÃO

O estado de carga de uma bateria pode ser utilizado para expressar a relação entre a quantidade de energia nela armazenada e disponível para uso, em comparação à sua capacidade de armazenamento máxima. Esse parâmetro é, portanto, expresso percentualmente, de modo que 100% representa uma bateria totalmente carregada e 0% indica não mais haver carga disponível. O estado de carga não possui unidade de medida e não pode ser medido diretamente (PLETT, 2015).

Plett (2015) destaca que para quantificar o estado de carga, é necessário saber quanta carga uma célula contém quando totalmente carregada, e quanta carga permanece quando completamente descarregada, sendo essa diferença denominada capacidade total, geralmente expressa em mAh (miliampere-hora). Na prática, porém, a capacidade total nunca pode ser extraída, pois toda bateria possui uma resistência interna que consome parte da energia armazenada durante o ciclo de descarga. Por isso, o conceito de capacidade de descarga, também expresso em mAh e sempre inferior à capacidade total, é utilizado em seu lugar.

A capacidade de descarga é o parâmetro utilizado pelos fabricantes ao especificar um modelo de bateria, e é sempre informada para uma taxa de descarga e tensão de fim de descarga específicas (MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM, 2008). Isso se deve ao fato de, conforme demonstrado por Reddy (2011), a capacidade de descarga variar de acordo com parâmetros como a temperatura da bateria, a taxa de descarga e o número de ciclos de carga da bateria.

Embora o estado de carga não possa ser medido diretamente, a capacidade de descarga pode, e a partir dela é possível estimar o Estado de carga (SOC) atual da bateria. Um dos métodos de medição mais utilizados é o de contagem de Coulomb, baseado na integração do valor da corrente instantânea sendo fornecida pela bateria. A premissa é que, sabendo-se a capacidade inicial disponível na bateria, basta subtrair a quantidade de Coulombs fornecida do valor inicial, obtendo-se um percentual de capacidade residual, sendo esse o SOC atual. Obter a capacidade inicial pode ser complexo, especialmente se a bateria está parcialmente carregada, e o erro de medição de corrente é cumulativo, o que pode levar a erros de estimativa significativos (XIONG, 2015).

Xiong (2015) também destaca outros métodos de medição direta, como o da tensão nos terminais da bateria, que tira proveito da característica de redução da tensão na medida em que é descarregada, comum a todos os tipos de bateria. Esse método utiliza uma base de dados obtida previamente para encontrar uma relação entre valores de tensão e o estado de carga atual.

Variações na corrente de carga geram flutuações de tensão que tornam difícil a aplicação deste método.

Métodos de alta demanda computacional também são utilizados, como os que utilizam o filtro de Kalman e suas variações, como o filtro de Kalman Unscented. Esse tipo de sistema é altamente dependente da obtenção de um modelo equivalente preciso da bateria, o que pode ser difícil na prática. Métodos com aprendizagem de máquina, como o de redes neurais, também são utilizados, exigindo ainda mais capacidade de processamento de dados (JIANG; ZHANG, 2015).

Quando aplicados em drones, porém, esses métodos precisam lidar com limitações adicionais, como restrições de espaço e peso, o baixo poder de processamento dos controladores utilizados e o padrão de consumo de energia desses dispositivos. As estimativas baseadas apenas em medições de tensão sofrem com as grandes oscilações de energia demandada pela aeronave durante as manobras, que tornam o método impreciso. Métodos de alta demanda computacional também são pouco atrativos pela indisponibilidade de *hardware* compatível.

Propondo-se a utilizar a estimativa precisa do estado de carga da bateria como um recurso para estender o tempo de voo de um drone, esse trabalho dará ênfase ao método de contagem de Coulomb. Seu princípio de funcionamento é tolerante a variações de demanda da carga e sua exigência de processamento é baixa, não exigindo *hardware* de alto custo e de consumo elevado.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O levantamento preciso do estado de carga do conjunto de baterias permite ao operador manter o drone no ar por mais tempo, sem risco de acidentes. Quando a estimativa carrega um erro significativo, o *software* pode ser programado para exibir valores inferiores aos estimados como uma medida de segurança, evitando o risco de queda da aeronave por falta de energia, ou ainda, pode forçar um pouso automático ao atingir um percentual de carga predeterminado.

Esse comportamento foi observado por Kim, Choi, Jeon, Kang e Cha (2020) ao comparar o método desenvolvido por eles com a estimativa fornecida pelo sistema de gerenciamento de bateria original de um grande fabricante de drones. Apesar de não terem acesso ao código fonte do sistema, que é proprietário, os autores acreditam que a capacidade de descarga é estimada com base em operações anteriores, o que pode levar a imprecisões consideráveis, e afirmam que esses drones geralmente forçam o pouso ao atingir um certo nível

de estado de carga, resultando no desperdício da energia restante e redução do tempo de voo. Os autores aferiram um ganho que chegou a 19,4% no tempo de voo com a substituição do sistema original pelo desenvolvido por eles, sem qualquer modificação na aeronave.

O estudo realizado por Sarkar, Totaro e Kumar (2020) com a linha *Enterprise* (composta por modelos de médio porte destinados às forças policiais, concessionárias de energia, etc.) desse mesmo fabricante de drones, mostra tempos de voo anunciados que vão de 22 a 40 minutos, em modelos com capacidade de decolagem com peso máximo entre 3600 e 15100g. Nesse cenário, ganhos de 19,4% se traduziriam em aumentos de tempo de voo que poderiam ultrapassar 7 minutos.

Isso tudo destaca a importância da utilização de um sistema de gerenciamento de bateria capaz de realizar leituras precisas da condição atual da mesma. As melhorias no método de estimativa de estado de carga propostas nesse trabalho, se aplicadas comercialmente, podem permitir oferecer ao mercado drones recreativos ou profissionais com maior autonomia de voo, sem recorrer ao uso de baterias de maior capacidade, que podem aumentar significativamente o custo do produto final.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de gerenciamento de bateria que se utilize de medições de tensão, corrente e temperatura para estimar o estado de carga de uma bateria Li-Ion (íons de lítio), visando a aplicação em drones. O sistema deve ser baseado no método da contagem de Coulomb, mas levará em conta parâmetros adicionais para prover em tempo real resultados com precisão aprimorada.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dessa monografia são:

- a) Demonstrar a relação e o impacto de parâmetros como a temperatura, taxa de descarga e o número de ciclos de carga da bateria na capacidade de descarga;
- b) Realizar uma sequência de testes de descarga em uma bateria Li-Ion para aquisição dos dados de caracterização;

O objetivo dos testes de aquisição dos dados de caracterização é entender o impacto da taxa de descarga e da temperatura na capacidade de descarga da bateria. Os dados obtidos serão considerados pelo algoritmo a ser utilizado no sistema de gerenciamento da bateria, visando gerar estimativas mais precisas.

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

Embora o objetivo dessa monografia seja desenvolver um sistema de gerenciamento de bateria (SGB) para uso em drones, o mesmo não será implementado em um drone real para a realização dos testes de validação. Ao invés disso, os testes serão realizados em uma bancada, com uma carga simulando a demanda energética altamente variável característica desse tipo de aplicação.

A exibição das estimativas geradas pelo algoritmo não será feita no *display* de um controle remoto utilizado no controle de drones, como normalmente acontece em uma aplicação real. Os dados serão exibidos em um computador, diretamente no *software* de programação Arduino IDE, conectado com o SGB via *Bluetooth* ou através de conexão cabeada.

Não serão implementados outros métodos de estimativa do estado de carga para comparação com o proposto nessa monografia sob as mesmas condições. Serão considerados os resultados anunciados por outros trabalhos acadêmicos que utilizam outras estratégias.

O sistema também será projetado para monitorar uma única célula de bateria, que não é suficiente para a maioria dos modelos comerciais, que utilizam *packs* com 2, 3 ou 4 baterias conectadas em série. Essa decisão visa evitar que as pequenas variações construtivas entre células de mesmo modelo e fabricante distorçam os resultados obtidos.

De acordo com Pop, Bergveld, Danilov, Regtien e Notten (2008), a função básica de um sistema de gerenciamento de bateria é otimizar o uso da energia disponível na bateria, e que esse objetivo é alcançado monitorando e controlando o processo de carga e descarga da bateria. Nesse trabalho, a etapa de carregamento será feita por um carregador encontrado no mercado, e sua influência nos resultados será desconsiderada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O termo “otimização” pode remeter a diferentes significados, de acordo com o contexto onde é aplicado. Na engenharia, a otimização de um sistema geralmente envolve minimizar os efeitos indesejáveis mais relevantes e/ou maximizar os efeitos desejáveis mais relevantes (ERTAS; JONES, 1993, p. 197).

A análise de Ertas e Jones (1993) também considera a existência de dois tipos de problemas de otimização: os de critério único e os multicritérios. No primeiro, visa-se maximizar ou minimizar um único parâmetro, enquanto no segundo é necessário considerar múltiplos fatores.

As considerações feitas ao longo do referencial teórico mostrarão que o problema abordado nesse trabalho é multicritérios. Isso porque, apesar do foco primário na melhor utilização da energia disponível na bateria para o aumento do tempo de voo, serão respeitados os diversos limites operacionais das células de bateria indicados pelo fabricante.

Esse capítulo fará inicialmente uma introdução aos drones, suas classificações e nomenclaturas. Também serão discutidas as particularidades das baterias utilizadas nesse tipo de aplicação, destacando os requisitos de maior relevância. Na sequência, serão listadas as principais características operacionais das baterias Li-Ion (íons de lítio) e Li-Po (polímero de lítio), demonstrando o impacto de cada uma delas na máxima capacidade de descarga.

Será analisado o impacto de fatores como a taxa de descarga, temperatura e do número de ciclos de carga na capacidade de descarga. A seguir, será feita uma abordagem dos conceitos de estado de carga (SOC), estado de saúde (SOH) e o tempo de operação restante (t_r) de uma bateria, essenciais para a implementação de um sistema de gerenciamento assertivo. Serão analisados os principais métodos de determinação desses parâmetros, bem como suas vantagens e desvantagens. Por fim, será feita uma revisão de alguns trabalhos acadêmicos com propostas similares à dessa monografia.

2.1 INTRODUÇÃO AOS DRONES

Na definição de Boyle (2020), drones são aeronaves de tamanho variável que não possuem um piloto a bordo. O autor considera características comuns à maioria dos drones, para fins comerciais ou militares:

- a) A possibilidade de serem controlados remotamente;
- b) A capacidade de executar manobras de voo;
- c) A possibilidade de serem reutilizados, mesmo em aplicações militares, ao contrário de mísseis e outros projéteis descartáveis.

Ainda segundo Boyle (2020), são características específicas de cada modelo de drone:

- a) Alcance;
- b) Tempo de voo;
- c) Velocidade máxima;
- d) Capacidade de carga.

Comercialmente, essas aeronaves são utilizadas na mineração, exploração remota, pesquisas geológicas, agricultura, transporte urbano e entrega de produtos, fotografias aéreas, entre outras aplicações. Apesar da sua popularização em aplicações comerciais ser relativamente recente, esse mercado atingiu em 2020 um valor estimado de 127 bilhões de dólares, com previsões de crescimento contínuo ao longo dos próximos anos (TARR; THOMPSON; ELLIS, 2021).

Conforme DECEA (2020), a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) classifica as aeronaves não tripuladas em três categorias:

- a) RPA (do inglês *Remotely Piloted Aircraft*), utilizadas com fins não-recreativos e com capacidade de interação com o Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM);
- b) Aeromodelos, operados para fins recreativos;
- c) Autônomas, que são caracterizadas por não permitir a intervenção humana após o início do voo.

A ANAC (2021) também classifica os drones de acordo com o peso máximo de decolagem. São consideradas três categorias, cada uma com regulamentações próprias:

- a) Classe 1: peso máximo de decolagem maior que 150kg;
- b) Classe 2: peso máximo de decolagem maior que 25kg e até 150kg;
- c) Classe 3: peso máximo de decolagem de até 25kg;

Além disso, alguns órgãos internacionais também classificam os modelos em função das características construtivas. A CASA (2021), autoridade australiana que regula a aviação civil no país, classifica os modelos nas seguintes categorias:

- a) Multirotores: possuem múltiplos rotores que rotacionam verticalmente. Eles decolam, pousam e se movimentam de maneira similar a um helicóptero de motor único;
- b) Helicópteros monorotores: se comportam de maneira semelhante a um helicóptero tradicional.
- c) Avião: caracterizados pela presença de asas fixas. Decolam e pousam horizontalmente, e geralmente não são capazes de permanecer em voo estático.
- d) Elevador motorizado: é capaz de decolar e pousar verticalmente, como um helicóptero, mas voa como um avião tradicional;
- e) Dirigível: é abastecido com um gás flutuante, que o torna mais leve que o ar.

A Figura 1 exibe um modelo multirotor de quatro motores, um dos mais comuns disponíveis comercialmente (AYAZ; RASHEED, 2021):

Figura 1 – Modelo tradicional de multirotor, composto de quatro motores



Fonte: AYAZ; RASHEED (2021).

A Figura 2 mostra um modelo de asa fixa utilizado para fins militares (U.S. AIR FORCE, 2015):

Figura 2 – Drone de asa fixa para aplicações militares



Fonte: U.S. AIR FORCE (2015).

2.2 REQUISITOS DA BATERIA PARA APLICAÇÃO EM DRONES

Drones são dispositivos de alta demanda energética. Estudos que visaram desenvolver modelos matemáticos para determinação do consumo de multirotores sob diferentes condições, demonstraram que modelos comerciais consomem cerca de 0,1W para cada grama de sua massa total, somente para se manterem em voo estático (MARINS; CABREIRA; KAPPEL; FERREIRA JR, 2018; ÇABUK; TOSUN; JACOBSEN; DAGDEVIREN, 2020).

Isso se traduz na necessidade do uso de baterias de baixo peso, alta densidade energética e alta capacidade de fornecimento de potência. A Tabela 1 demonstra como as baterias tipo Li-Ion e, especialmente, as Li-Po, atendem melhor a esses requisitos, quando comparadas a outros modelos amplamente disponíveis no mercado:

Tabela 1 – Comparativo entre diferentes tipos de baterias

	Energia específica (Wh/kg)	Densidade de Energia volumétrica (Wh/l)	Potência Específica (W/kg)
NiCd	40-60	50-50	150
NiMh	60-120	140-300	250-1000
Pb	30-40	60-75	180
Li-Ion	90-160	250-730	250-340
Li-Po	130-200	300	2000-5000
LiFePO4	90-110	220	>300

Fonte: Adaptado de STRINGARI (2020).

A densidade de energia volumétrica dos modelos Li-Ion os torna ideais para modelos com restrições de espaço significativas ou que precisem abrigar grandes quantidades de células de bateria. Já a excelente potência específica permitida pelos modelos Li-Po os torna ideal para a maior parte dos drones comerciais para uso profissional e recreativo, especialmente quando grandes autonomias de voo não são prioridade no projeto.

2.3 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DAS BATERIAS

2.3.1 Taxa de descarga

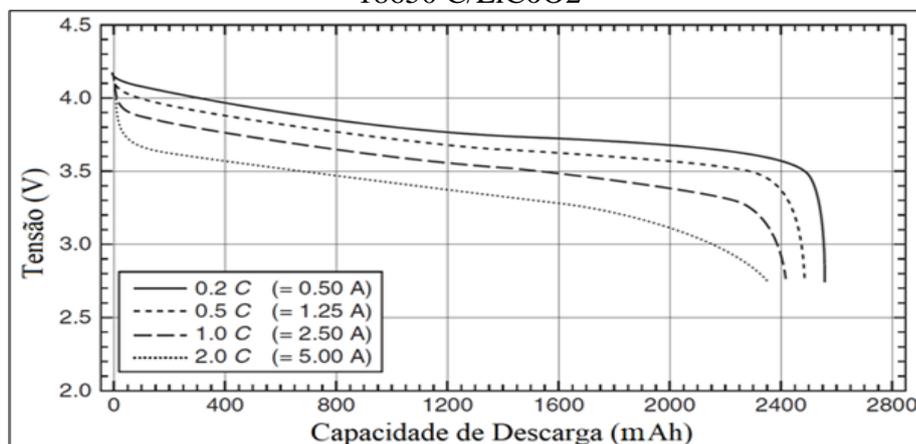
É comum que baterias tenham sua capacidade de fornecimento de corrente especificadas por meio da taxa de descarga “C”. 1C representa a corrente que a célula é capaz de fornecer pelo período de 1 hora (uma célula de 20Ah, por exemplo, deve ser capaz de entregar aproximadamente 20A durante uma hora ou 2A por um período de 10 horas) (PLETT, 2015).

Baterias Li-Ion comuns têm um valor típico de 1C, o que significa que ela pode ser descarregada de maneira constante em um período mínimo de 1 hora (REDDY, 2011). Alguns modelos recentes de alta capacidade podem trabalhar em taxas próximas, ou por vezes superiores a 10C (LAIN; KENDRICK, 2021). Já as baterias Li-Po podem ser encontradas facilmente no mercado com taxas de descarga constantes de até 25C ou 35C, mas modelos de maior capacidade também se encontram disponíveis (CHUANGFENG; PINGAN; XUEYAN, 2011).

2.3.1.1 Impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga

Aumentar a taxa de descarga resulta em uma menor capacidade de descarga em qualquer tipo de bateria, em função da maior perda de energia causada por sua resistência interna (BUCHMANN, 2011). Esse fenômeno pode ser visualizado na Figura 3, que mostra o efeito da variação da taxa de descarga na capacidade de descarga de uma bateria Li-Ion LiCoO₂:

Figura 3 – Impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga de uma bateria Li-Ion 18650 C/LiCoO₂

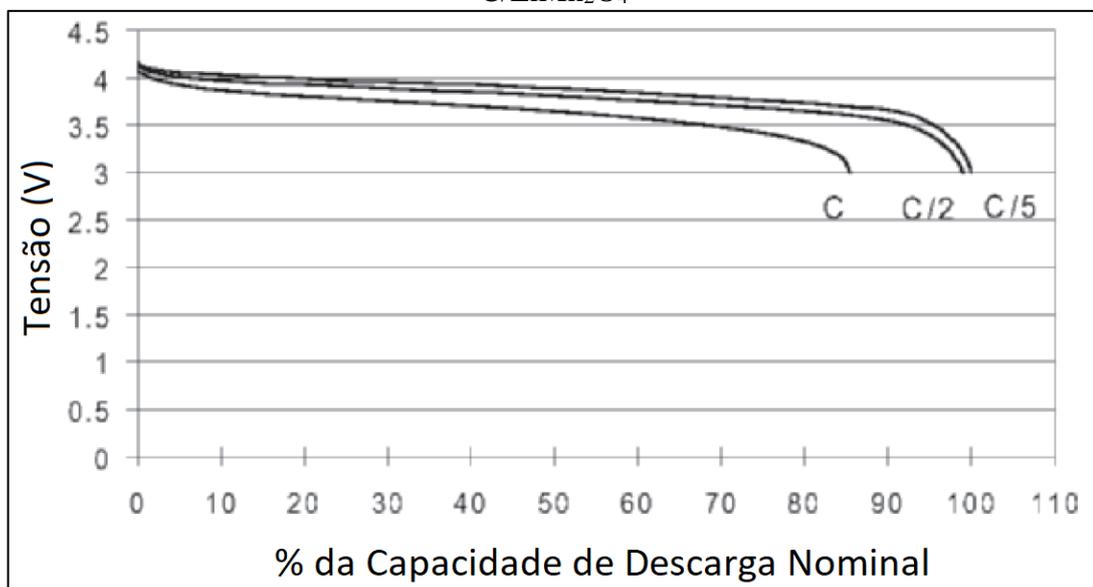


Fonte: Adaptado de REDDY (2011).

Nesse ensaio realizado em um ambiente a 20°C, uma taxa de descarga de 0,2C permitiu o fornecimento de aproximadamente 2550mAh, valor que foi reduzido para 2380mAh a 2C. Ensaios de capacidade de descarga são interrompidos quando a tensão de fim de descarga é atingida, valor esse que varia de acordo com o modelo em análise, e que nesse caso é de 2,75V (REDDY, 2011).

A Figura 4 mostra um ensaio similar realizado com uma bateria Li-Po C/LiMn₂O₄:

Figura 4 – Impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga de uma bateria Li-Po C/LiMn₂O₄



Fonte: Adaptado de LINDEN; REDDY (2002).

A célula foi carregada até 4,2V e descarregada até 3,0V, e a capacidade de descarga foi de aproximadamente 98% do valor nominal a 0,5C para cerca de 85% a 1C (LINDEN; REDDY, 2002). O resultado indica que a redução na capacidade de descarga em função do aumento da taxa de descarga não ocorre de maneira linear.

2.3.2 Temperatura da bateria

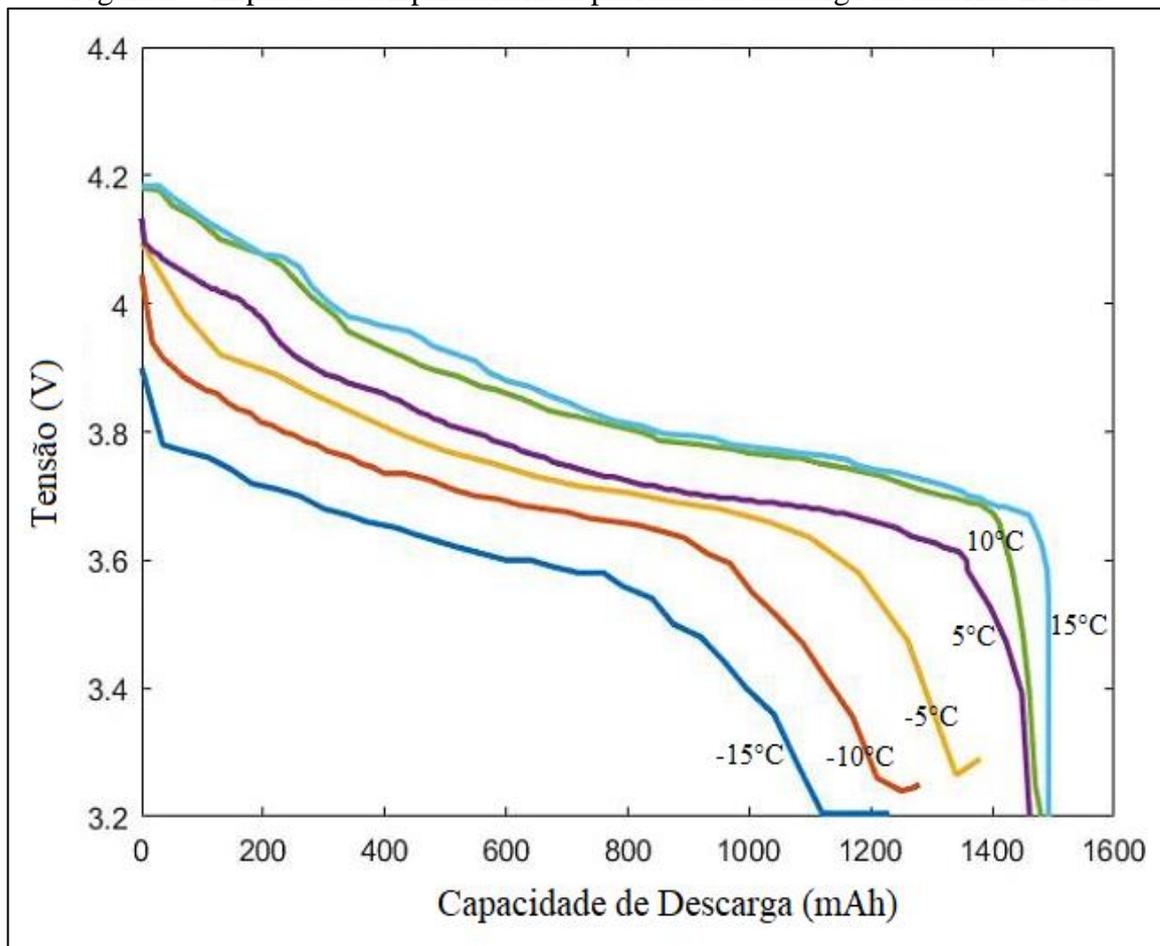
Os processos em uma bateria são eletroquímicos por natureza, e todas as reações químicas ocorrem a taxas mais elevadas na medida em que a temperatura aumenta. Por consequência, a tendência é que a tensão na célula e, principalmente, a capacidade de descarga, aumentem na medida em que a temperatura aumenta (PETROVIC, 2021).

De modo geral, baterias Li-Ion operam em condições ideais com temperaturas entre 15 e 35°C. A Operação em temperaturas inferiores a 15°C pode resultar em conversões eletroquímicas lentas, e temperaturas superiores a 35°C causam degradação acelerada (PERASAN; SANTHANAGOPALAN; KIM, 2013). Já para Buchmann (2015), para esse tipo de bateria, temperaturas acima de 30°C podem ser consideradas elevadas.

2.3.2.1 Impacto da temperatura da bateria na capacidade de descarga

A Figura 5 mostra a variação da capacidade de descarga de um modelo Li-Ion de composição química não informada em função da temperatura:

Figura 5 – Impacto da temperatura na capacidade de descarga de baterias Li-Ion

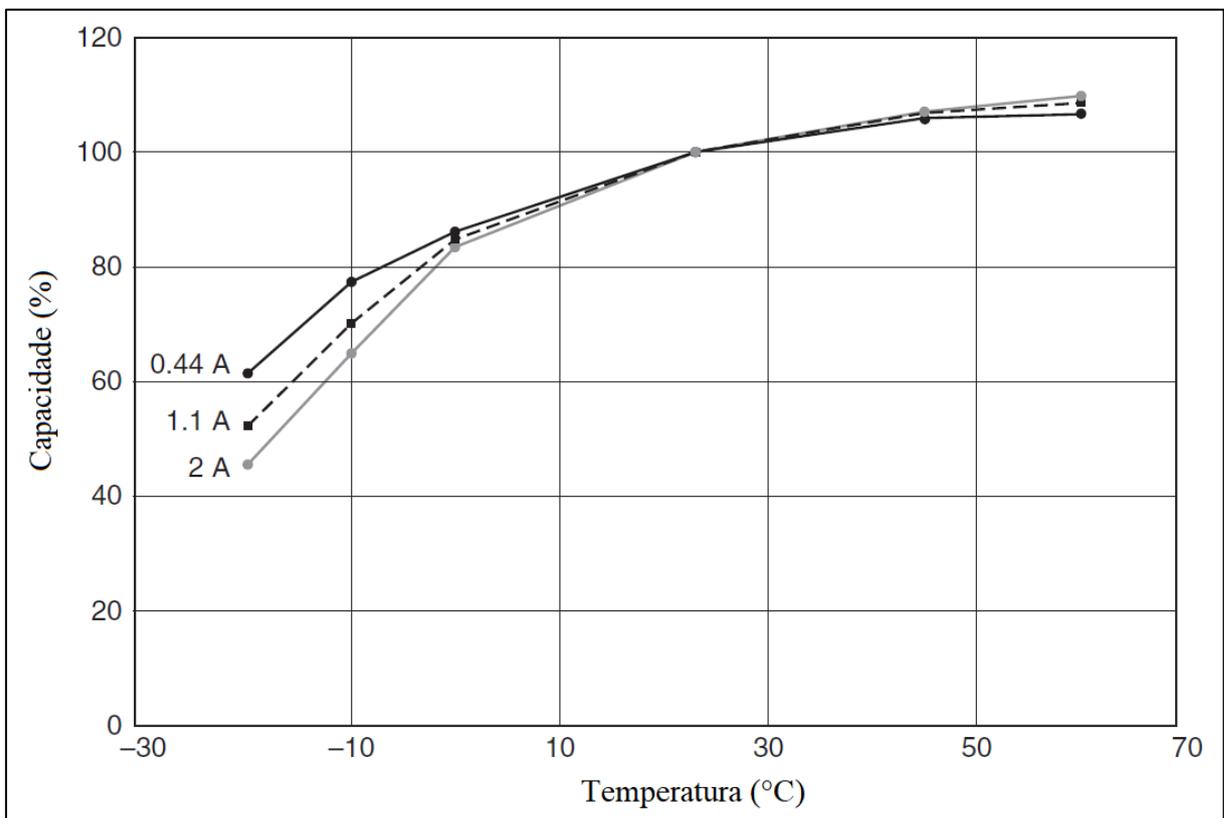


Fonte: Adaptado de ARIS; SHABANI (2016).

A descarga foi efetuada a uma taxa de 5C, até o limite de 3,2V. A capacidade de descarga aferida a -15°C foi aproximadamente 75% da encontrada a 15°C (ARIS; SHABANI, 2016).

A Figura 6 mostra o resultado de um ensaio similar realizado em uma bateria Li-Ion IHR18650B, que demonstra que é possível obter capacidades de descarga superiores às nominais trabalhando com temperaturas superiores às recomendadas:

Figura 6 – Impacto da temperatura na capacidade de descarga de uma bateria Li-Ion IHR18650B

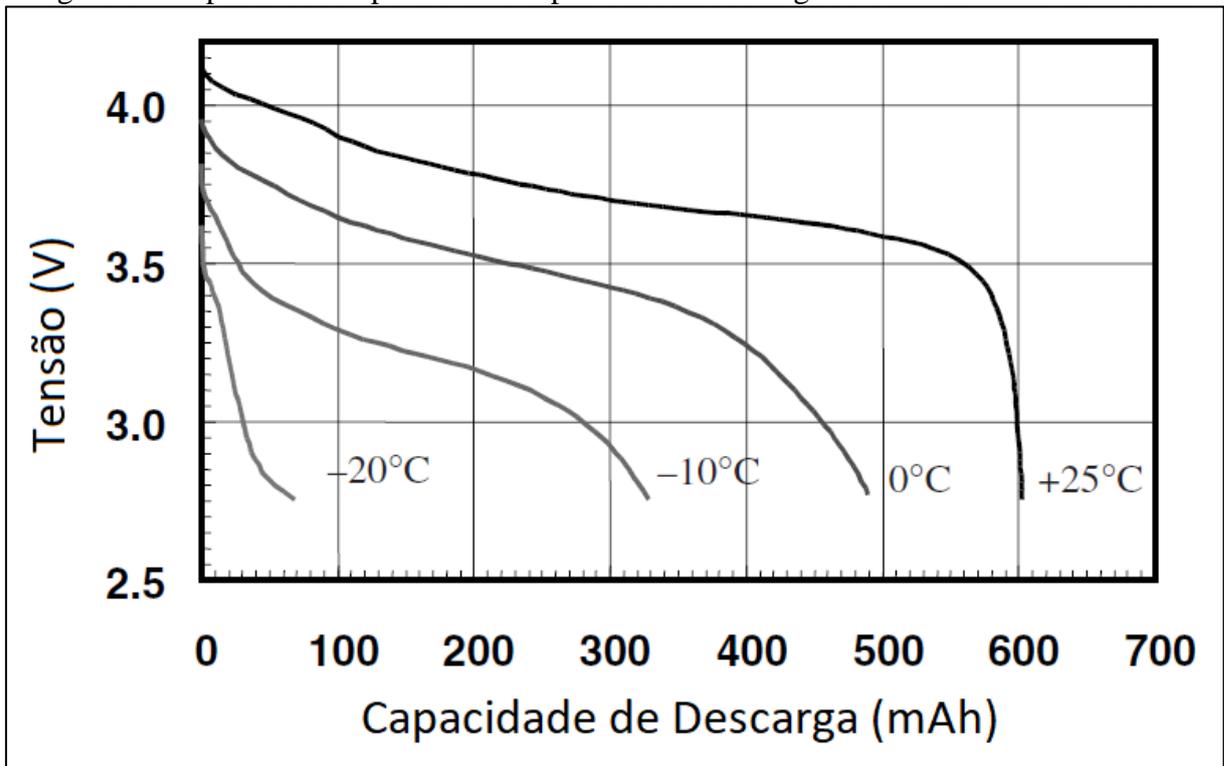


Fonte: Adaptado de REDDY (2011).

Em todos os ensaios, a bateria foi carregada até 4,2V e descarregada até 3,0V. A capacidade nominal foi aferida nos testes realizados a 23°C , para todas as correntes de descarga testadas, e a 60°C foi possível extrair 110% da capacidade nominal, com uma corrente de descarga de 2A (REDDY, 2011).

A Figura 7 mostra uma variação de capacidade muito mais drástica em uma célula Li-Po C/LiCoO₂:

Figura 7 – Impacto da temperatura na capacidade de descarga de baterias Li-Po C/LiCoO₂



Fonte: Adaptado de LINDEN; REDDY (2002).

Considerando uma taxa de descarga de 1C em todos os casos, a capacidade de descarga aferida a -20°C foi de aproximadamente 70mAh, cerca de 12% da obtida a 25°C (LINDEN; REDDY, 2002). Isso demonstra que esse tipo de bateria pode ser particularmente sensível a baixas temperaturas.

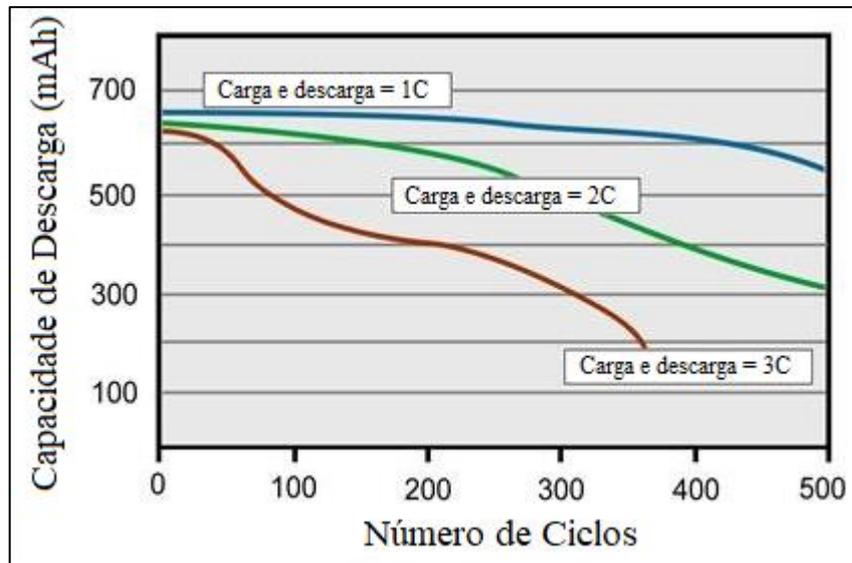
2.3.3 Número de ciclos de carga

O ciclo de vida de uma bateria (tipicamente considerado, para modelos Li-Ion, o número de carregamentos suportados até que a bateria não mais seja capaz de fornecer 80% de sua capacidade nominal) depende da composição química, construção e materiais utilizados. Os fabricantes especificam o ciclo de vida para certas condições de carga e descarga, como a taxa de descarga, temperatura e profundidade de descarga (PETROVIC, 2021).

2.3.3.1 Impacto do número de ciclos de carga da bateria na capacidade de descarga

A Figura 8 mostra ainda o impacto do número de ciclos de carga em conjunto com a variação da taxa de descarga de uma bateria Li-Ion de composição química não informada:

Figura 8 – Impacto do nº de ciclos de carga e taxa de descarga na capacidade de descarga de uma bateria Li-Ion

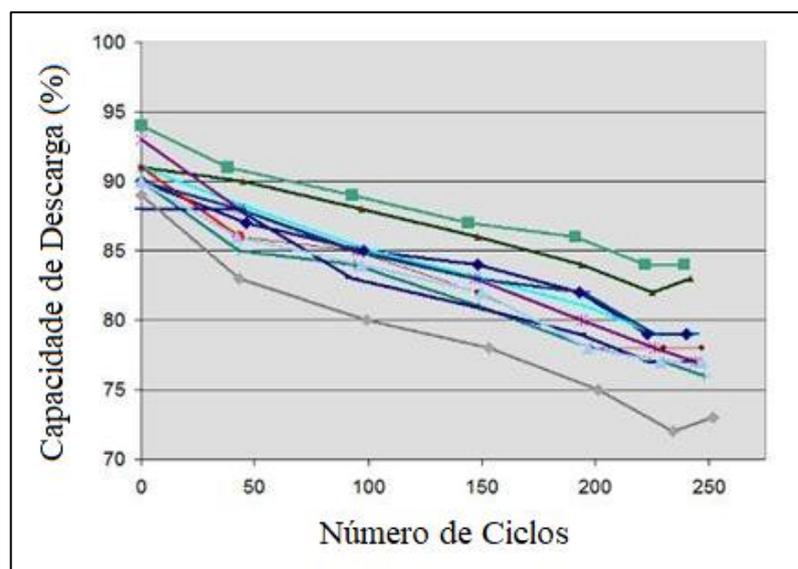


Fonte: Adaptado de BUCHMANN (2011).

Em todos os ensaios, a bateria foi carregada até 4,2V e descarregada até 3,0V, em um ambiente controlado de 23°C (BUCHMANN, 2011). Esse gráfico sugere que em aplicações de uso intensivo do conjunto de baterias, como drones, a vida útil das mesmas pode ser reduzida drasticamente.

A Figura 9 mostra o resultado de um estudo semelhante com baterias Li-Po:

Figura 9 – Impacto do nº de ciclos de carga na capacidade de descarga de baterias Li-Po



Fonte: Adaptado de BUCHMANN (2011).

O ensaio avaliou 11 modelos Li-Po, todas com capacidade nominal de 1500mAh. Todas foram repetidamente carregadas até 4,2V e descarregadas até 3,0V, com corrente de carregamento e de descarga de 1500mA (1C). Todos os modelos apresentaram uma capacidade inicial entre 88 e 94% da nominal, valor que foi reduzido para valores entre 73 e 84% após 250 ciclos (BUCHMANN, 2011).

2.4 CONCEITOS BÁSICOS PARA PROJETO DE UM SGB

2.4.1 Estado de carga (SOC)

O estado de carga de uma bateria, frequentemente abreviado com a sigla SOC (do inglês *State of Charge*), pode ser definido como o percentual da carga máxima possível que se encontra disponível em uma bateria recarregável (POP; BERGVELD; DANILOV; REGTIEN; NOTTEN, 2008). Xiong (2015) utiliza uma analogia atrelada ao conjunto de baterias de um veículo elétrico para explicar esse conceito: o estado de carga do conjunto equivale ao medidor do nível de combustível presente em um automóvel tradicional, com motor a combustão.

O estado de carga pode ser expresso, portanto, de modo percentual, sendo “100%” uma representação de uma bateria carregada até seu limite de capacidade de armazenamento, e “0%” a indicação de que ela está totalmente descarregada. Fisicamente, em baterias Li-Ion, o estado de 100% significa que todos os íons de lítio se encontram no eletrodo negativo, e em 0% todos os íons terão sido transferidos para o eletrodo positivo (SUNDÉN, 2019).

2.4.2 Estado de saúde (SOH)

De acordo com a definição de Pop, Bergveld, Danilov, Regtien e Notten (2008), o estado de saúde é uma medida da condição atual de uma bateria em relação a um modelo sem uso (estado de novo), com relação à sua capacidade de entregar um certo nível de desempenho. Xiong (2015) afirma que a capacidade das baterias de armazenar energia, bem como de carregar e descarregar rapidamente diminui na medida em que ela se degrada, e considera o estado de saúde um índice quantitativo que permite avaliar seu grau de envelhecimento.

Segundo Pop, Bergveld, Danilov, Regtien e Notten (2008), a determinação desse parâmetro pode ser bastante complexa, muito em função do alto grau de imprevisibilidade com relação às condições em que a bateria será utilizada. Alguns dos fatores elencados são:

- a) O usuário nem sempre aguardará seu carregamento completo para voltar a utilizá-la, ou sua descarga completa para realizar um novo carregamento;
- b) O padrão de consumo de energia pode variar de acordo com cada usuário, que pode utilizá-la de forma mais ou menos agressiva;
- c) A temperatura do ambiente de utilização pode variar significativamente;
- d) Pequenas diferenças construtivas entre unidades do mesmo modelo, o chamado *spread*.

Em função disso, os autores apontam a necessidade de um sistema adaptativo, de modo a obter aferições mais coerentes do estado de carga na medida em que a célula envelhece. Xiong (2015) também destaca que a determinação precisa do estado atual de carga depende do conhecimento do estado de saúde exato da bateria avaliada.

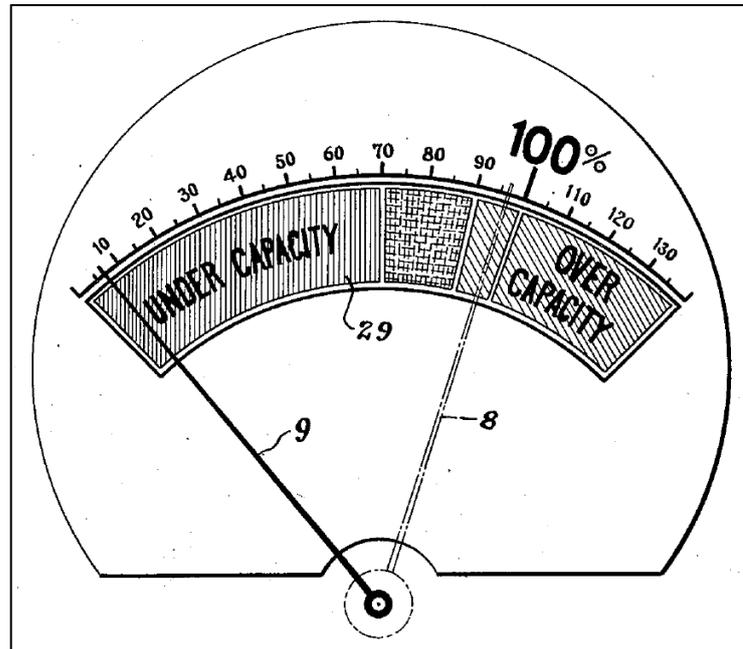
2.5 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE CARGA

2.5.1 Medições de tensão

Sistemas de determinação de SOC por meio de medições de tensão são datados ao surgimento das primeiras baterias recarregáveis. Um dispositivo pioneiro capaz de indicar a capacidade de descarga restante, bem como a necessidade de substituição da bateria, foi introduzido em 1938 por Benjamin F. W. Heyer, e funcionava com base em medições de tensão (POP; BERGVELD; DANILOV; REGRIEN; NOTTEN, 2008).

O medidor de Heyer se baseou no comportamento natural de uma bateria, que tende a apresentar uma redução na tensão em seus terminais na medida em que fornece uma corrente a uma carga qualquer. O dispositivo drenava uma determinada corrente elétrica enquanto monitorava a queda de tensão, e com base no valor aferido indicava ao usuário a capacidade daquela bateria. Caso o valor fosse inferior a 70%, o usuário deveria recarregar a bateria e então refazer a medição, e caso o resultado indicasse novamente uma capacidade menor que 70%, deveria substituir a bateria (HEYER, 1938). A Figura 10 mostra o painel do equipamento patenteado por Heyer:

Figura 10 – Painel do medidor de SOC de Heyer, de 1938



Fonte: Adaptado de HEYER (1938).

2.5.1.1 Medições de tensão de circuito aberto

Em 1975, Clinton C. Christianson e Robert F. Bourke patentearam um circuito para detectar e indicar o estado de carga de uma bateria com base na determinação da tensão de circuito aberto, mesmo com a bateria em uso. Os autores se basearam na Equação (1):

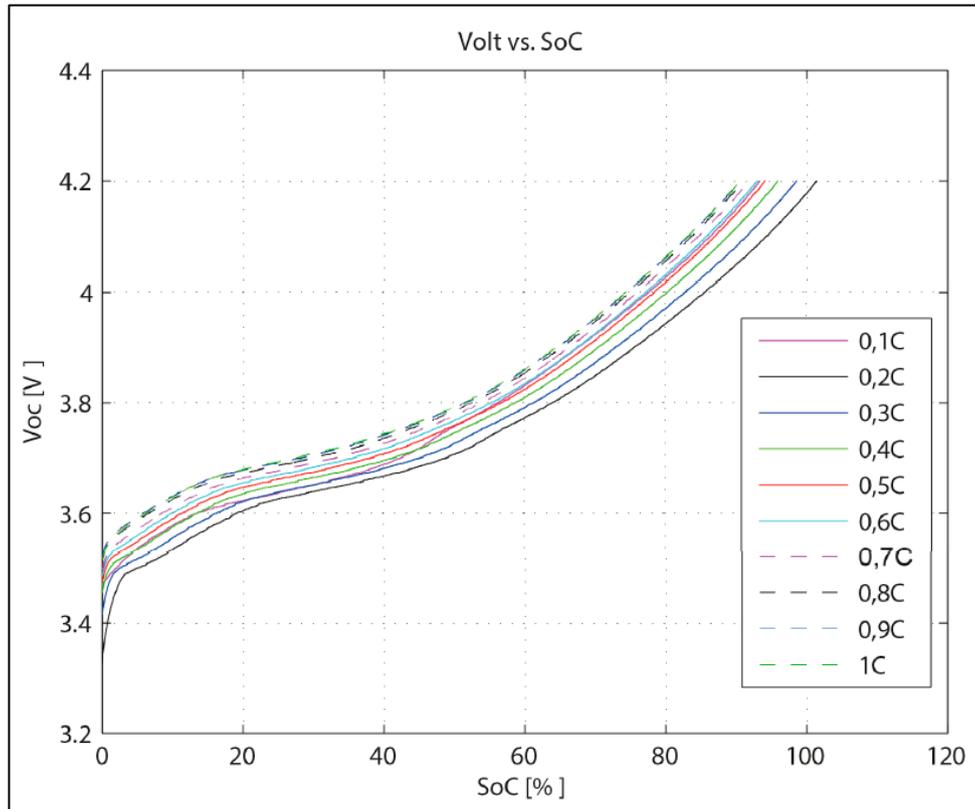
$$E_{abe} = E_{term} + I \times R \quad (1)$$

Onde E_{abe} representa a tensão de circuito aberto, E_{term} a tensão instantânea medida em seus terminais durante o uso, I é a corrente sendo consumida por uma carga e R a resistência interna da bateria. Com a determinação da tensão de circuito aberto, é possível estimar o SOC percentual consultando uma tabela que relacione ambos os parâmetros e que tenha sido preenchida com base em testes realizados em uma unidade do mesmo modelo de bateria (CHRISTIANSON; BOURKE, 1975).

Conforme destacado por Barrera, Galeano e Maldonado (2017), métodos baseados em medição de tensão possuem alguns problemas inerentes que precisam ser considerados em aplicações práticas. Ensaios realizados pelos autores mostram que a relação entre a tensão de

circuito aberto e o estado de carga muda significativamente de acordo com a corrente de carregamento, como mostrado no exemplo da Figura 11:

Figura 11 – Relação entre o SOC e a tensão de circuito aberto em uma bateria LiNiCoMnO₂



Fonte: BARRERA; GALEANO; MALDONADO (2017).

A relação entre SOC e a tensão de circuito aberto também sofre a influência de diversos outros fatores, como o envelhecimento da bateria, variações de temperatura e da taxa de descarga e, portanto, é necessário realizar diversas correções nos valores para obter estimativas mais próximas da realidade. Isso tudo faz com que métodos de medição de tensão sejam usados majoritariamente como uma ferramenta complementar a outros métodos de determinação de SOC (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).

Medições de tensão de circuito aberto também exigem que a bateria permaneça em repouso para atingir um estado balanceado, tornando esse um método de medição *offline*, ou seja, que não pode ser aplicado durante a carga ou descarga da bateria. Isso o torna pouco útil em aplicações práticas (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).

2.5.1.2 Medições de tensão de carga

Durante o processo de descarga da bateria, quando a corrente consumida pela carga é estável, a variação na tensão de carga em função do SOC é similar ao que é visto com a tensão de circuito aberto, o que significa que esse parâmetro pode ser utilizado para estimar o estado atual de carga em tempo real. No entanto, em aplicações práticas podem ocorrer grandes flutuações de tensão, o que torna o uso desse método mais complexo (JIANG; ZHANG, 2015).

Ainda de acordo com Jiang e Zhang (2015), para que esse método funcione adequadamente, é preciso coletar uma quantidade significativa de dados de tensão a fim de criar um modelo matemático que seja capaz de relacionar a tensão de carga com o estado de carga da bateria, corrente fornecida, temperatura, entre outros parâmetros. Mesmo quando não utilizada para fins de determinação do SOC, a tensão de carga é normalmente utilizada para definir os pontos de interrupção do uso e de carregamento da bateria.

2.5.2 Contagem de Coulomb (método da integração de corrente)

A energia armazenada em uma bateria idealmente equivale ao somatório ao longo do tempo da corrente entregue a ela. A capacidade restante em uma célula pode ser calculada com base na medição da corrente acumulada entrando ou saindo da mesma, o que pode ser obtido matematicamente pelo processo de integração. O ponto de referência da calibração é a célula completamente carregada, e o índice de SOC instantâneo pode ser encontrado com a subtração do fluxo de carga sendo fornecido pela bateria a cada instante (KUMAR; SASTRY; SEKHAR; MOHANTA; RAJESH; VARMA, 2016).

De acordo com Xiong (2015), o estado de carga baseado em medições de corrente pode ser obtido com base na Equação (2):

$$z(t) = z(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t (ni \times iL(\tau)) d\tau}{C_{max}} \quad (2)$$

Onde $z(t)$ equivale o valor de SOC no instante t , $z(t_0)$ indica o SOC inicial da bateria quando totalmente carregada, ni é a eficiência Coulômbica do conjunto, que precisa ser determinada experimentalmente, $iL(\tau)$ representa a corrente de carga ou descarga instantânea e C_{max} é a capacidade máxima da bateria sob as condições atuais. No caso de baterias Li-Ion, o

índice ni geralmente é considerado 1 durante a etapa de descarga e entre 0,98 e 1 durante o carregamento, desde que taxa de descarga não seja superior a 3C (XIONG, 2015).

De acordo com Pop, Bergveld, Danilov, Regtien e Notten (2008), a determinação da corrente instantânea acontece tipicamente através da medição da tensão em um resistor *shunt* conectado em série com a bateria, e então, através da lei de Ohm, o dispositivo calcula a corrente. Em sistemas com consumos maiores de corrente, é necessário utilizar modelos *shunt* com resistências mais baixas e maior capacidade de dissipação de potência. A baixa resistência *shunt* implica em uma menor queda de tensão, o que pode tornar a medição mais complexa e mais suscetível a erros.

O método de contagem de Coulomb não consegue estimar o valor inicial de SOC, então o mesmo precisa ser conhecido, e eventuais erros de medição são cumulativos. Isso acontece por se tratar de um sistema de medição de *loop* aberto, onde erros se acumulam em função do processo de integração (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).

Ainda de acordo com Barrera, Galeano e Maldonado (2017), outros fatores afetam a precisão dos resultados obtidos por esse método, como a idade da bateria, taxa de descarga e a própria precisão do sensor responsável pela medição da corrente. Apesar disso, é considerado o método padrão na indústria e o mais utilizado para determinação do estado de carga.

2.5.3 Filtro de Kalman

De acordo com Xiong (2015), o Filtro de Kalman é o sistema baseado em algoritmo mais utilizado para a determinação do estado de carga de uma bateria. Esse filtro é conveniente para processamento em tempo real, desde que provido de *hardware* apropriado, e trata o erro de medição como ruído e os parâmetros a serem estimados como variáveis de estado.

Xiong (2015) destaca que o método original só é válido para sistemas lineares, o que não é o caso de conjuntos de bateria, sendo, portanto, necessário realizar uma etapa adicional de linearização com a chamada Expansão de Taylor, resultando no que é conhecido como filtro de Kalman estendido. O autor afirma ainda que o filtro de Kalman é baseado na suposição que o modelo de sistema utilizado é preciso e que as características estáticas do ruído sejam conhecidas, mas na prática, ambos são difíceis de serem determinados.

Esse tipo de algoritmo sofre também com sua alta complexidade, alta exigência computacional e instabilidade. As operações matriciais complexas inerentes a esse método tornam sua implementação difícil em microcontroladores comuns. Além disso, a resposta do

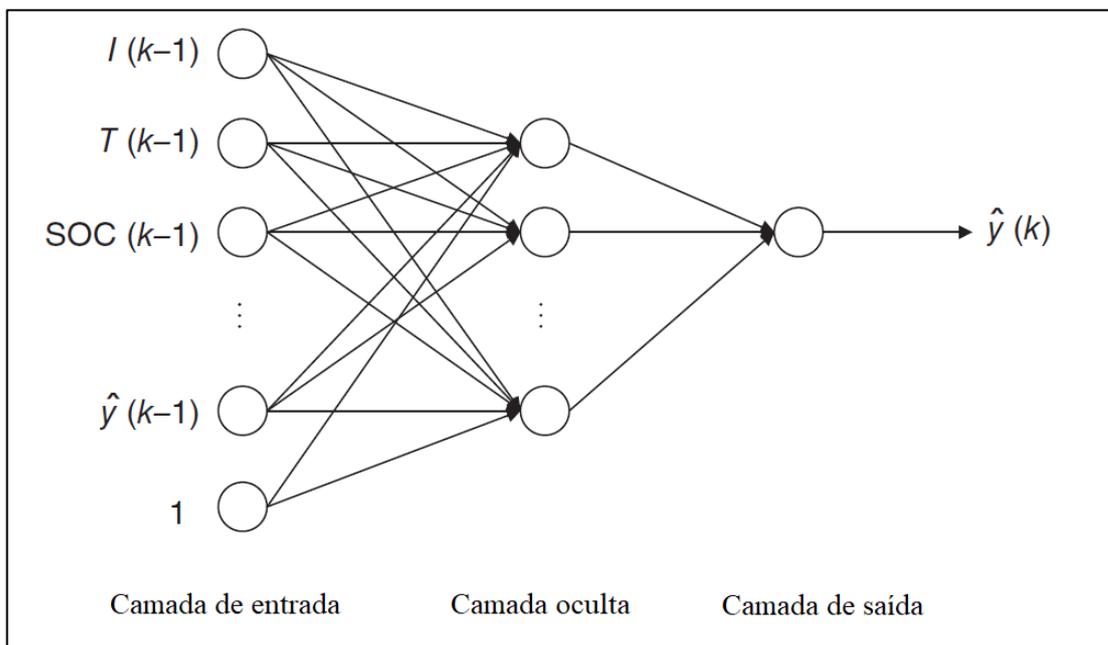
filtro de Kalman é degradada quando existem incertezas consideráveis a respeito da estrutura do modelo, parâmetros físicos, níveis de ruído e condições iniciais (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).

2.5.4 Redes neurais

Como baterias são sistemas altamente não-lineares, é difícil construir um modelo matemático capaz de descrever com perfeição o processo de carga e descarga. Nesse contexto, mecanismos baseados em redes neurais são úteis devido à sua característica não-linear, estrutura paralela e capacidade de aprendizado. (JIANG; ZHANG, 2015).

Jiang e Zhang (2015) afirmam que, tipicamente, redes neurais de três camadas são utilizadas para estimar o estado de carga de uma bateria. As variáveis de entrada nesse tipo de aplicação podem incluir medições de tensão, corrente, temperatura e resistência, e a escolha do número adequado de variáveis influencia diretamente a precisão do modelo. A Figura 12 mostra a estrutura de uma rede neural baseada em uma bateria:

Figura 12 – Estrutura de uma rede neural para obtenção do estado de carga de uma bateria



Fonte: adaptado de JIANG; ZHANG (2015).

Barrera, Galeano e Maldonado (2017) destacam a necessidade da adição de quantidades maiores de neurônios para aumentar a precisão desses sistemas, o que limita sua implementação

em modelos reais. Citando o exemplo da aplicação em veículos elétricos, o autor afirma que esse método não é adequado devido à alta demanda de processamento computacional e longo processo de aprendizagem.

Outra limitação mencionada pelos autores é o fato de uma rede neural treinada com base no comportamento de uma bateria nova não será precisa com outra já deteriorada, tendendo a superestimar sua capacidade. Devido ao caráter de *loop* aberto, o treinamento *online* da rede neural, e por consequência sua adaptação ao nível de envelhecimento da bateria, não é possível.

2.6 TRABALHOS CORRELATOS

Nessa etapa serão mostrados alguns trabalhos acadêmicos que utilizaram diferentes abordagens para a determinação do SOC de uma bateria. Devido à grande variedade de métodos propostos, somente uma pequena amostra será discutida nessa monografia. Sistemas originais embarcados em drones disponíveis comercialmente não serão avaliados, pois os dados relevantes a seu respeito (como os parâmetros medidos, método e erro da estimativa) não são disponibilizados pelos fabricantes.

2.6.1 Artigo de Kim, Choi, Jeon, Kang e Cha (2020)

Denominado Optrone, o sistema aposta na detecção da “célula mais fraca” em um conjunto de baterias, e realiza as estimativas com base apenas no monitoramento dessa célula. Para isso, ele primeiramente mede e armazena a tensão de circuito aberto de cada uma das células no instante da inicialização do sistema, quando os motores da aeronave não estão ligados. A seguir, o índice da “célula mais fraca” é obtido a partir da diferença entre a tensão inicial e a tensão após a decolagem, quando o conjunto estará fornecendo energia aos motores. Considera-se que a célula que apresentou maior variação de tensão é a mais fraca, o que é uma consequência direta de sua resistência interna.

A seguir, o Optrone divide o estado de carga em 3 níveis:

- a) SOC morto: reflete a capacidade perdida por propriedades estáticas, como o peso da aeronave, temperatura ambiente e o envelhecimento da bateria. Seu valor é obtido através de equações matemáticas baseadas em testes realizados previamente;
- b) SOC reserva: particularmente dependente de flutuações de potência. É determinado com base em medições de corrente (método de contagem de Coulomb);

c) SOC ativo: considerado pelos autores um indicador confiável para estimar o tempo de voo restante. É obtido a partir de medições de tensão nos terminais da célula.

A capacidade de descarga da célula também é calculada com base em equações matemáticas obtidas a partir de ensaios prévios, e é atualizada durante o voo de acordo com a temperatura ambiente medida na inicialização do sistema (os autores consideram as variações de temperatura durante o voo desprezíveis) e na taxa de descarga média durante o voo atual. A soma do SOC ativo e o SOC reserva indicam a capacidade de descarga restante.

O resultado desse método de três níveis é um erro anunciado inferior a 3%. Os autores compararam o resultado com uma simulação do sistema aplicando um filtro de Kalman Unscented no *software* Matlab, onde encontraram um erro de 10,5%, mais alto que o próprio sistema original do drone. O erro anunciado é baseado somente no SOC indicado pelo sistema no instante em que a tensão de fim de descarga é atingida, momento onde o SOC real é de 0%.

2.6.2 Artigo de Cheng, Yi, Liang, Song e Liu (2020)

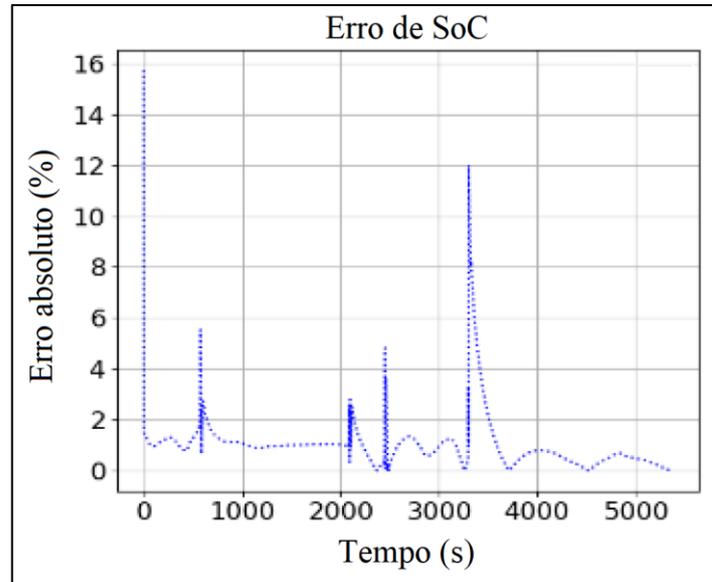
Aqui, os autores desenvolveram um método de duplo propósito, capaz de determinar o estado de carga e o estado de potência. Somente o primeiro será abordado nessa monografia.

A estimativa é feita com base em uma arquitetura de rede neural de memória longa de curto prazo composta por 3 camadas, que recebe medições de tensão e corrente na entrada, e libera em sua saída um número entre 0 e 1, correspondente ao estado de carga atual. A escolha é justificada pela capacidade desse tipo de arquitetura de desconsiderar dados antigos em prol de dados mais recentes, característica útil para previsão de séries temporais.

O resultado é então aplicado em um filtro de Kalman. Seu uso é, segundo os autores, importante em função de ruídos que podem influenciar as medições, ou ainda, devido a grandes variações de corrente, que são comuns durante certas manobras da aeronave.

O erro médio absoluto obtido em uma simulação de descarga foi de 1,038% com a aplicação do filtro de Kalman e de 1,185% quando o filtro não foi utilizado. Nesse caso, o erro anunciado representa a média entre todas as estimativas realizadas durante o processo de descarga, e não somente o erro na estimativa final (ao atingir a tensão de fim de descarga). A Figura 13 mostra o erro do sistema ao longo do tempo:

Figura 13 – Erro do sistema desenvolvido por Cheng Et al. na estimativa do estado de carga



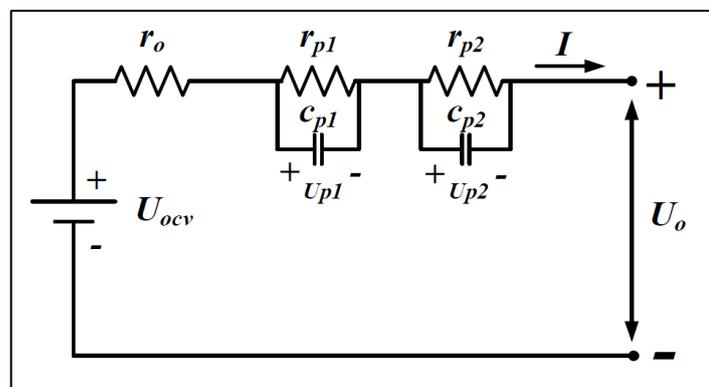
Fonte: adaptado de CHENG; YI; LIANG; SONG; LIU (2020).

2.6.3 Artigo de Guo e He (2020)

A proposta de Guo e He é aliar o tradicional método de contagem de Coulomb com um método iterativo. O objetivo é manter a alta precisão nas estimativas, mas com uma carga de cálculo menor, o que reduz o poder de processamento necessário. Segundo os autores, o mecanismo proposto pode reduzir em mais de 90% a carga matemática, quando comparado com métodos que utilizam o filtro de Kalman estendido ou o filtro H-infinito.

Inicialmente, considera-se um modelo RC de segunda ordem para representar a bateria, conforme mostrado na Figura 14:

Figura 14 – Modelo equivalente da bateria utilizado pelo sistema de Guo e He

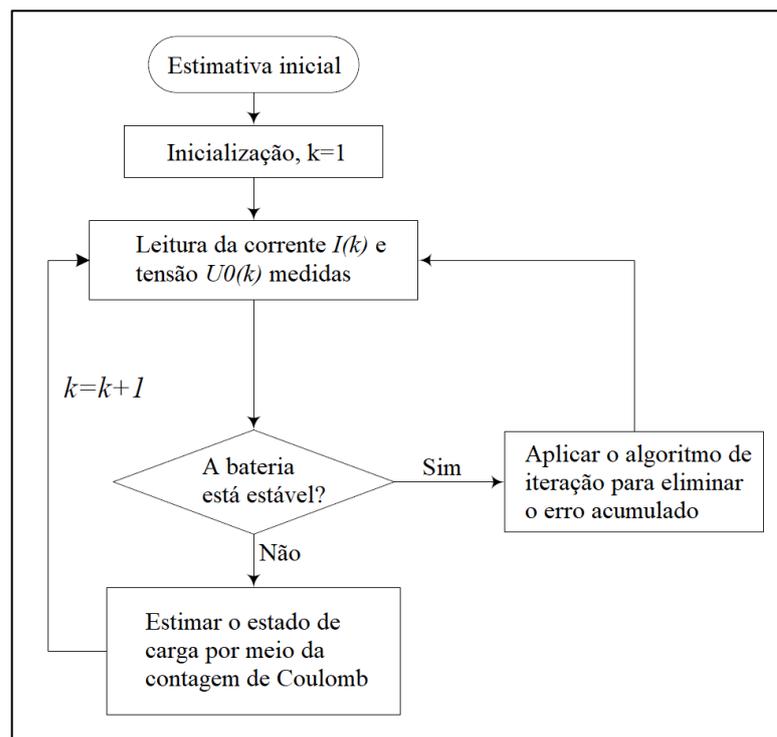


Fonte: GUO; HE (2020).

Nele, U_{ocv} é uma fonte de tensão, r_0 é a resistência interna, $Cp1$, $rp1$, $Cp2$ e $rp2$ formam duas redes RC e U_0 é a tensão nos terminais da bateria. Os parâmetros, além da curva $SOC-OCV$, são obtidos através de um processo que não é detalhado no artigo, e a partir deles, se obtém uma curva que traduz a relação entre a resistência interna r_0 e a tensão de circuito aberto U_{ocv} .

Com isso, o algoritmo é capaz de calcular o estado de carga baseado em medições de tensão, o que permite eliminar o erro acumulado pelo método de contagem de Coulomb. Essa calibração só acontece quando a bateria está em estado estável, conforme o fluxograma da Figura 15:

Figura 15 – Fluxograma do método proposto por Guo e He



Fonte: adaptado de GUO; HE (2020).

Os autores consideram a bateria estável quando $Up1$ e $Up2$ forem iguais a $I.rp1$ e $I.rp2$, respectivamente. Enquanto não há estabilidade, o estado de carga é estimado por meio da contagem de Coulomb, ou seja, por meio da medição da corrente fornecida pela bateria.

A iteração se baseia na estrutura expressa pela Equação 3:

$$OCV_{l+1} = U_0(k) + R_l \times I(k) = U_0(k) + g(OCV_l) \times I(k) \quad (3)$$

Onde $Uo(k)$ e $I(k)$ são as medições de tensão nos terminais da bateria e da corrente, respectivamente, Rl e $OCVl$ são os valores calculados da resistência R e OCV (tensão de circuito aberto) na iteração l . Após a definição de um valor inicial $OCV0$, a solução numérica de OCV pode ser obtida após uma iteração finita. Por fim, com o valor de OCV , o estado de carga pode ser estimado pela curva $SOC-OCV$ determinada previamente.

O erro encontrado com o uso do algoritmo proposto é de cerca de 1,5%, enquanto que nos testes realizados somente com a contagem de Coulomb, com a mesma bateria Li-Ion 18650, foi de aproximadamente 3,5%. O artigo não deixa claro qual o método utilizado para chegar a esses números.

2.7 COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO SOC

A análise de diferentes métodos de determinação do estado de carga de uma bateria demonstrou que cada um deles possui um conjunto específico de características e limitações, que podem limitar ou até mesmo impedir seu uso em certas condições. A Tabela 2 apresenta de forma resumida as principais vantagens e desvantagens de cada um dos métodos abordados nesse trabalho:

Tabela 2 – Comparativo entre métodos de determinação do SoC de uma bateria

	Principais Vantagens	Principais Desvantagens
Medições de tensão de circuito aberto	Simplicidade (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).	Somente realiza medições <i>offline</i> , requer longo tempo de descanso da bateria antes da medição, impreciso na região central do SoC, influência da corrente de carregamento (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).
Medições de tensão de carga	Medição <i>online</i> (JIANG; ZHANG, 2015).	Implementação difícil para cargas que geram grandes flutuações de tensão, exige coleta de dados prévia para criação de modelo matemático (JIANG; ZHANG, 2015).

	Principais Vantagens	Principais Desvantagens
Contagem de Coulomb	<p>Medição <i>online</i>, fácil implementação, baixo custo computacional, excelente desempenho em tempo real (XIONG, 2015).</p> <p>Funciona em qualquer sistema de bateria (POP; BERGVELD; DANILOV; REGTIEN; NOTTEN, 2008).</p>	<p>Dependente da informação do SoC inicial, o cálculo de <i>loop</i> aberto exige revisão periódica devido ao erro acumulado (pontos de recalibração), suscetível a corrente de deriva e ruídos, requer mecanismo complementar para determinar o grau de envelhecimento da bateria (XIONG, 2015).</p>
Filtro de Kalman	<p>Medições <i>online</i>, dinâmico, funciona em qualquer sistema de bateria (POP; BERGVELD; DANILOV; REGTIEN; NOTTEN, 2008).</p>	<p>Complexidade em implementar um algoritmo de filtragem que considere todas as anormalidades e não-linearidades (POP; BERGVELD; DANILOV; REGTIEN; NOTTEN, 2008).</p> <p>Alta exigência computacional, instabilidade, alta dependência da precisão do modelo matemático da bateria utilizado, altamente dependente da precisão dos sensores utilizados (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).</p>
Redes neurais	<p><i>Online</i>, altamente adaptável, eficiente em sistemas não-lineares (JIANG; ZHANG, 2015).</p> <p>Funciona em qualquer sistema de bateria (POP; BERGVELD; DANILOV; REGTIEN; NOTTEN, 2008).</p>	<p>Exige muitos neurônios para resultado preciso, alta exigência computacional, longo período de aprendizagem, incapaz de se adaptar a baterias desgastadas (BARRERA; GALEANO; MALDONADO, 2017).</p>

Fonte: Elaboração própria.

3 METODOLOGIA

Nesta monografia se propôs o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de bateria destinado especificamente para uso em drones. O sistema é capaz de apresentar em tempo real o estado de carga de uma bateria Li-Ion, bem como estimar o tempo de operação restante com base nos padrões de demanda energética do voo atual.

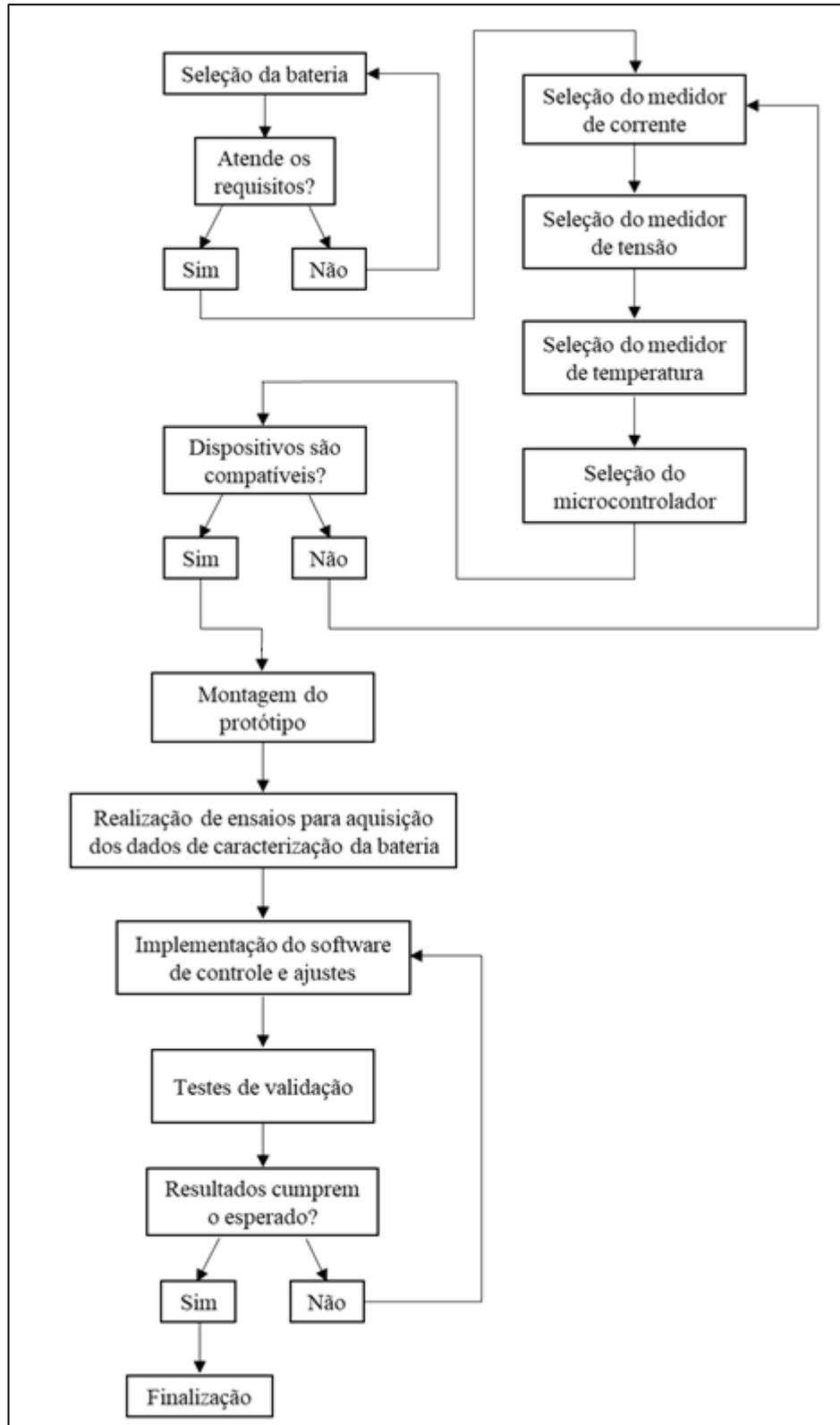
O sistema opera com base em medições *online* de tensão de carga e no método da contagem de Coulomb, realizando para isso um monitoramento preciso da corrente fornecida pela bateria a cada instante. Uma sequência de simulações prévias foi realizada para determinação do impacto da taxa de descarga e da temperatura da célula na capacidade de descarga, originando uma base de dados de correção utilizada no algoritmo responsável por gerar as estimativas.

O desafio foi elaborar um sistema de baixa demanda computacional e baixo consumo de energia (características importantes para utilização em drones), capaz de realizar estimativas com nível de precisão similar ao das obtidas por métodos mais complexos e de alta demanda computacional, como é o caso dos que utilizam o filtro de Kalman estendido ou métodos de aprendizagem de máquina, como os baseados em redes neurais. O número de ciclos de carga e descarga para caracterização do modelo da bateria foi inferior a 20, o que permite mais facilmente a adaptação do método para outros modelos de bateria.

O sistema é capaz de realizar as estimativas mesmo com a inserção de baterias não totalmente carregadas, e não utiliza dados de ensaios anteriores (exceto as de caracterização da bateria) para a determinação do estado da bateria utilizada no ciclo atual. O objetivo é garantir sua aplicabilidade em um cenário real de utilização de drone, onde o usuário normalmente utiliza diversos conjuntos de bateria de forma alternada, realizando o carregamento de uma bateria enquanto utiliza outra na aeronave, podendo ainda por vezes inserir uma célula carregada parcialmente.

A Figura 16 mostra um fluxograma da sequência de atividades realizadas para atingir o objetivo proposto:

Figura 16 – Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: Elaboração própria.

3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DA BATERIA

Para permitir a implementação adequada da metodologia proposta, foram definidos alguns requisitos técnicos mínimos para serem atendidos pela bateria utilizada no projeto:

- a) Taxa de descarga máxima igual ou superior a 2C;
- b) Permitir a operação em temperaturas entre 10 e 30°C;
- c) Potência nominal igual ou superior a 15W;
- d) Construção do tipo Li-Ion ou Li-Po;
- e) Disponibilidade de descritivo técnico do fabricante que permita a confirmação dos parâmetros acima.

Em função do seu baixo custo de aquisição e atendimento aos requisitos básicos estabelecidos, o modelo Li-Ion ICR18650-26F da Samsung foi escolhido para o desenvolvimento do projeto. As especificações técnicas nominais especificadas pelo fabricante se encontram na Tabela 3:

Tabela 3 – Especificações técnicas nominais do modelo ICR18650-26F

Item	Especificação
Capacidade nominal	2600mAh (descarga de 0,2C, até 2,75V)
Tensão de carregamento	4.2 ±0.05 V
Tensão nominal	3,7V
Método de carregamento	Tensão constante com corrente limitada
Máxima corrente de carregamento	2600mA
Máxima corrente de descarga	5200mA
Tensão de corte de descarga	2,75V
Temperatura de operação	Carga: 0 a 45°C, Descarga: -20 a 60°C

Fonte: adaptado de SAMSUNG (2009).

3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS

3.2.1 Medição de corrente e tensão

Para ser considerado adequado ao projeto, definiu-se alguns requisitos mínimos para o sensor utilizado nas medições de corrente e tensão:

- a) Suportar uma tensão de alimentação de 5V, podendo ser alimentado diretamente pelo microcontrolador;
- b) Suportar a leitura de tensões de no mínimo 5V, permitindo o monitoramento da tensão nos terminais da bateria;
- c) Permitir a leitura de correntes de no mínimo 5,2A, capacidade máxima de fornecimento da bateria ICR18650-26F;
- d) Ter saída de dados digital, com barramento I²C;

O sensor escolhido foi o módulo INA226, da *Texas Instruments*. A Tabela 4 mostra as principais características técnicas do modelo:

Tabela 4 – Especificações técnicas do módulo sensor INA226

Item	Especificação
Tensão de alimentação	2,7 a 5,5V
Faixa de leitura de tensão <i>bus</i>	0 a 36V
Máxima corrente de carga	Ilimitada (<i>shunt</i> externo)
Máxima queda de tensão no <i>shunt</i>	81,92mV
Erro típico de ganho de tensão <i>shunt</i>	0,02%
Erro máximo de ganho de tensão <i>shunt</i>	0,10%
Erro típico de ganho de tensão <i>bus</i>	0,02%
Erro máximo de ganho de tensão <i>bus</i>	0,10%
Barramento de saída	I ² C ou SMBUS

Fonte: adaptado de TEXAS INSTRUMENTS (2015).

Além de atender a todos os requisitos mínimos, o INA226 se destaca por suportar a leitura de tensões até 36V, o que permitiria seu uso inclusive em sistemas de gerenciamento com múltiplas células conectadas em série. Seu erro máximo de ganho de tensão de base é 0,10% também é bastante satisfatório, e o modelo pôde ser encontrado facilmente em distribuidores no mercado nacional.

Módulos sensores com o resistor *shunt* integrado como o INA250, INA253 ou INA260 simplificariam a implementação e proporcionariam erros de medição ainda mais baixos, mas esse tipo de sensor geralmente possui limitações de corrente de carga (TEXAS INSTRUMENTS, 2020) que impediriam sua implementação nesse projeto. Esses modelos também não são facilmente encontrados no mercado, tornando sua aquisição mais difícil.

Já a comunicação I²C permite a alteração de alguns parâmetros de funcionamento do sensor, o que permite seu ajuste, por exemplo, para o funcionamento ideal com o valor de resistividade escolhido para o *shunt*, ou ainda, alterar a frequência com que os valores medidos são atualizados e disponibilizados para o microcontrolador, o que impacta o erro de leitura. Outra vantagem da saída digital é evitar o erro de medição adicional existente quando a saída é analógica, já que nesse caso o sinal teria que ser inserido em uma entrada analógica do microcontrolador para leitura e posterior conversão para digital.

3.2.1.1 Determinação do resistor *shunt*

A escolha do resistor *shunt* deve respeitar a queda de tensão máxima no resistor que pode ser lida pelo sensor INA226, que conforme a Tabela 4, é de 81,92mV. Com isso, o valor máximo de resistividade do componente pode ser obtido com a Equação 4:

$$R_{shuntmax} = \frac{V_{shuntmax}}{I_{max}} \quad (4)$$

Considerando $V_{shuntmax}$ igual a 81,92mV e que a corrente máxima do sistema poderá atingir picos de até 15% acima da capacidade da bateria, que é de 5200mA, I_{max} pode ser considerado igual a 5980mA. Com isso, $R_{shuntmax}$ equivale a aproximadamente 13,7mΩ.

Dentre os modelos encontrados comercialmente, o escolhido foi o shunt cerâmico de 15mΩ, com variação de ±1%, cuja resistividade ultrapassa o limite especificado. Por conta disso, o mesmo foi conectado em paralelo ao resistor interno do INA226, de 100mΩ, resultando em uma resistência equivalente de 13,04mΩ, atendendo ao limite proposto. Foi considerado que as variações de temperatura no *shunt* são pouco expressivas para as condições de operação propostas, e, portanto, as variações de resistividade resultantes serão desprezadas.

3.2.2 Medição de temperatura

O sensor de temperatura utilizado possui os seguintes requisitos mínimos:

- a) Suportar uma tensão de alimentação de 5V, podendo ser alimentado diretamente pelo microcontrolador;
- b) Ter um erro de medição máximo de ±1°C;
- c) Atender a faixa de temperatura entre 5 e 35°C;

- d) Ter construção compacta e que permita sua inserção próximo à superfície da bateria.

O sensor LM35 da *Texas Instruments* foi escolhido, pelo atendimento das características mínimas e pela opção com o encapsulamento TO-92, que o torna ideal para inserção em uma placa de circuito impresso. Suas características técnicas principais são exibidas na Tabela 5:

Tabela 5 – Especificações técnicas do sensor LM35

Item	Especificação
Tensão de alimentação	-0,2 a 35V
Faixa de leitura de temperatura	-55 a 150°C
Erro máximo a 25°C	±0,5°C
Erro típico entre -55 a 150°C	±0,75°C
Erro máximo a -55°C	±1°C
Erro máximo a 150°C	±1°C

Fonte: adaptado de TEXAS INSTRUMENTS (2017).

3.2.3 Microcontrolador

Na escolha do microcontrolador, foram priorizados modelos compactos, leves e com possibilidade de conexão permanente em uma placa de circuito impresso, aspectos importantes para a aplicação em um drone. A compatibilidade com o barramento I²C é necessária para compatibilidade com o sensor INA226, e são necessárias duas entradas analógicas para aquisição do sinal dos dois sensores de temperatura instalados.

O microcontrolador Arduino Nano V3.0 foi o escolhido. A Tabela 6 traz as principais características do modelo:

Tabela 6 – Especificações técnicas do Arduino Nano V3.0

Item	Especificação
Tensão de alimentação	7 a 12V
Processador	ATmega328 16 MHz
Memória	32KB flash
Entradas/Saídas digitais	14

Item	Especificação
Entradas analógicas	8
Entradas PWM	6
Peso	5g
Dimensões	18x45mm
Conexão USB	Mini USB

Fonte: adaptado de ARDUINO (c2021).

Em sua versão 3.0, o Nano utiliza o processador ATmega328 de 16 MHz, o mesmo do Arduino Uno, que proporciona um desempenho limitado, mas suficiente para a aplicação e de baixo consumo energético. Apesar do tamanho bastante compacto, conta com conexão Mini USB, diferentemente de outras placas de tamanho similar, como a Pro Mini da própria Arduino, o que facilita a implementação da fase de programação e de ajustes (ARDUINO, c2021).

3.2.4 Carga controlada

Três resistores reguláveis com capacidade de até 10Ω e 100W, bem como um resistor de até 100Ω e 25W foram associados em série e simularam uma carga real, com o controle de todos sendo realizado de modo manual. A escolha desses resistores se deu em função da possibilidade de ajuste fino da resistência total de carga, o que permitiu um controle mais preciso da corrente fornecida pela bateria.

3.2.5 Elevador de tensão

A falta de disponibilidade de controladores de velocidade e motores 1S, adequados para uso com apenas uma célula de bateria e ideais para esse projeto, fez com que os modelos 2-4S escolhidos não pudessem ser alimentados diretamente pela bateria ICR18650-26F em função da tensão insuficiente em seus terminais. Por isso, fez-se necessário elevar a tensão para um nível adequado ao ESC, atendendo ao mesmo tempo à corrente máxima prevista para o sistema. Foram considerados os seguintes requisitos mínimos para o elevador de tensão:

- a) Suportar a faixa de tensão de entrada entre 2,75 e 4,25V;
- b) Fornecer em sua saída a tensão de $14\pm 1V$, quando alimentado por uma bateria ICR18650-26F totalmente carregada;

- c) Suportar fornecer momentaneamente em sua saída uma potência de até 25,42W, correspondente à corrente de pico máxima prevista para o sistema com a bateria totalmente carregada;
- d) Suportar fornecer continuamente em sua saída uma potência de até 22,1W, correspondente à corrente nominal máxima prevista para o sistema com a bateria totalmente carregada;

Não se encontrou no mercado um conversor capaz de atender a todos os requisitos estabelecidos. Optou-se então por utilizar três unidades do módulo elevador de tensão SX1308 conectadas em paralelo. A Tabela 7 descreve as características do conversor:

Tabela 7 – Especificações técnicas do elevador de tensão SX1308

Item	Especificação
Tensão de entrada	2 a 24V
Tensão de saída	2 a 28V, ajustável
Corrente máxima de saída	2A
Frequência de chaveamento máxima	1,2MHz

Fonte: adaptado de MATTS ELECTRONICS (201-).

Testes preliminares realizados mostraram que uma única unidade do conversor é incapaz de fornecer a potência necessária, já que a corrente máxima de saída anunciada pelo fabricante não é atingida pelo componente. Com a associação de três unidades em paralelo, todos os requisitos estabelecidos foram atendidos.

3.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA BATERIA

Conforme demonstrado nos tópicos 2.3.1.1, 2.3.2.1 e 2.3.3.1, a taxa de descarga, a temperatura e o número de ciclos de carga (envelhecimento da célula) podem influenciar significativamente a capacidade de descarga de uma bateria. O algoritmo utilizado considerou que a capacidade de descarga da bateria para uma determinada condição pode ser determinada com base na Equação 5:

$$CD = CD_{max} \times FCD \times FCT \times FCE \quad (5)$$

Onde CD é a capacidade de descarga real, em mAh, disponível com a bateria totalmente carregada, CD_{max} é a capacidade de descarga máxima, obtida apenas em condições ideais de operação, FCD , FCT e FCE são os fatores de correção de taxa de descarga, temperatura e envelhecimento da bateria, respectivamente.

3.3.1 Determinação de CD_{max}

Embora SAMSUNG (2009) informe uma capacidade nominal de 2600mAh para o modelo ICR18650-26F, a capacidade de descarga máxima pode variar significativamente, inclusive devido a variáveis fora do escopo deste trabalho, como a corrente de carregamento, o período em que a bateria permaneceu armazenada, a temperatura e o percentual de carga em que foi mantida. Para fins de desenvolvimento desse projeto, foi considerada a capacidade de descarga máxima atingível dentro das condições de operação previstas, ou seja, com temperatura entre 10 e 30°C e taxa de descarga entre 0,25 e 1,0C. Com isso, foi considerado o valor de CD_{max} a capacidade de descarga encontrada com a melhor combinação de temperatura e taxa de descarga, em uma bateria considerada nova e sem desgaste (com menos de 20 ciclos de descarga).

3.3.2 Determinação de FCD

O fator de correção de taxa de descarga foi calculado a partir de uma equação polinomial obtida com base nos ensaios realizados nessa etapa. Para que o efeito da temperatura pudesse ser desconsiderado, todos os ensaios foram realizados de modo que temperatura na bateria permanecesse em 25°C (condição onde o FCT é 1). Como a bateria é nova e o número total de ensaios para aquisição dos dados de caracterização foi inferior a 20, o desgaste da bateria ao longo do processo foi desprezado, e considerou-se, portanto, que FCE também equivale a 1.

Foram realizados nessa etapa 4 ensaios, um para cada uma das seguintes taxas de descarga: 0,25C, 0,5C, 0,75C e 1C. Ensaios em taxas de descarga superiores a 1C foram desconsiderados, pois durante os testes a bateria apresentou grande instabilidade e perda de capacidade de descarga. Considerando que FCT e FCE possuem valor unitário, para cada taxa de descarga foi calculado o FCD correspondente através da Equação 6:

$$FCD = \frac{CD}{CD_{max}} \quad (6)$$

A partir dos valores calculados, foi feita a determinação de uma equação polinomial que descreva a variação do *FCD* em função da taxa de descarga. O grau da equação foi aumentado de acordo com o necessário para que o coeficiente de determinação (R^2) seja igual ou superior a 0,98. A equação polinomial permitiu ao algoritmo estimar o *FCD* para qualquer taxa de descarga no intervalo entre 0,25 e 1,0C (650 a 2600mA).

Embora se considere que descargas abaixo de 0,2C sejam incomuns durante o voo de um drone, elas são possíveis momentaneamente durante manobras de descida ou na fase de decolagem. Correntes de descarga superiores à máxima podem causar dano permanente à bateria e devem ser evitadas, entretanto, por vezes podem ser necessárias em curtos espaços de tempo, durante manobras rápidas. Para ambos os casos, a equação gerada permite ao algoritmo estimar o *FCD* fora da faixa de operação prevista, ainda que sujeito a erros maiores.

3.3.3 Determinação de *FCT*

O fator de correção de temperatura foi obtido de maneira similar ao *FCD*. Embora a capacidade máxima de descarga se dê a 200mA, para evitar um gasto excessivo de tempo nessa etapa, as medições foram realizadas a 0,25C, com a aplicação do *FCD* obtido na etapa anterior. *FCE* foi novamente considerado unitário.

Foram realizados 5 ensaios nessa etapa, cada um deles mantendo a temperatura ambiente em um dos seguintes valores: 10°C, 15°C, 20°C, 25°C e 30°C. Como *FCD* não é unitário, foi considerado na Equação 7:

$$FCT = \frac{CD}{CD_{max} \times FCD(0,25C)} \quad (7)$$

A etapa de determinação da equação polinomial e a extrapolação dos valores ocorreu conforme descrito anteriormente. Embora a bateria seja capaz de operar em temperaturas inferiores a 10°C e superiores a 30°C, estes cenários estão fora do escopo apresentado e, portanto, nesses casos se permitiu a incerteza adicional causada pela função gerada.

3.3.4 Determinação de *FCE*

De acordo com Samsung (2009), a capacidade residual do modelo após 299 ciclos de carga e descarga, ambos a 0,5C, será de no mínimo 1785mAh (68,65% da nominal). Isso indica a necessidade da realização de centenas de ensaios a fim de obter a equação polinomial de *FCE*. O fator de correção por envelhecimento da bateria não foi implementado em função da indisponibilidade de tempo para realização dos ensaios necessários e pela natureza destrutiva dos mesmos, sendo esse fator considerado unitário em todas as equações onde se faz presente.

3.3.5 Pontos de calibração do algoritmo

Conforme destacado no tópico 2.6, o método de contagem de Coulomb tem como característica o acúmulo de erros de medição, sendo, portanto, necessário realizar calibrações periódicas no algoritmo. Existe também a possibilidade da inicialização do sistema com uma bateria parcialmente carregada. O algoritmo monitora continuamente a tensão nos terminais da bateria com o objetivo de verificar a coerência das estimativas de SOC baseadas nas medições de corrente. Medições de tensão também foram utilizadas para estimar o percentual de carga inicial da bateria no instante de inicialização do sistema de gerenciamento da bateria.

A sequência de ensaios descrita no tópico 3.3.2 foi utilizada também para a realização de medições de tensão de carga, permitindo o levantamento da curva de tensão ao longo do tempo para diversas taxas de descarga entre 0,25 e 1,0C. Uma equação foi gerada baseada nos resultados obtidos, permitindo estimativas para correntes intermediárias às testadas.

3.3.6 Transmissão e registro das medições

As medições realizadas foram transmitidas uma vez por segundo para um computador conectado ao Arduino por meio da porta micro USB presente no microcontrolador. Para cada sensor, o valor enviado é a média de todas as medições realizadas desde a última transmissão (aproximadamente 490 a cada segundo), de modo que nenhuma medição foi perdida ou desconsiderada no processo.

A ferramenta de *software* utilizada foi a *Data Streamer*, uma extensão para o *Microsoft Excel* disponível por meio do *Microsoft Education Workshop*. Por meio dela, é possível

monitorar continuamente os dados enviados pelo microcontrolador, visualizá-los em tempo real e gravá-los em um arquivo de formato .csv para processamento posterior.

3.3.7 Controle de temperatura do ambiente de realização dos ensaios

Para a manutenção da temperatura desejada nos ensaios, foi adaptada uma caixa térmica de poliestireno expandido equipada com uma pastilha de Peltier termoelétrica TEC1-12706. Em ambos os lados da pastilha, foi colocado um dissipador térmico e uma ventoinha para otimizar a troca térmica com o ambiente. A placa protótipo produzida permaneceu no interior da caixa durante a realização de todos os ensaios de caracterização.

A pastilha termoelétrica é acionada pelo microcontrolador de acordo com a necessidade, baseando-se na temperatura aferida pelos sensores de temperatura LM35 presentes na placa. É possível aquecer ou resfriar o interior da caixa, sendo necessário apenas inverter a polaridade de alimentação da pastilha que, embora tenha tensão nominal de 12V, foi alimentada com somente 10V, suficiente para atingir as temperaturas desejadas.

3.4 IMPLANTAÇÃO DO *SOFTWARE* DE CONTROLE E VALIDAÇÃO DO SGB

3.4.1 Implementação do *software* de controle

A implementação e transferência do algoritmo para a placa controladora foi feita através do *software* Arduino IDE, disponível gratuitamente para *download*. O *software* utiliza uma linguagem de programação própria. O código se encontra disponível no Apêndice C.

3.4.2 Validação do sistema

Inicialmente foram realizados três ensaios de descarga com corrente constante de 1000, 1400 e 1800mA na mesma unidade de bateria utilizada na etapa de aquisição dos dados de caracterização, para avaliação do funcionamento do sistema e do algoritmo. A seguir, foram realizadas três descargas com corrente variável na mesma bateria, com o objetivo de simular uma condição de voo real.

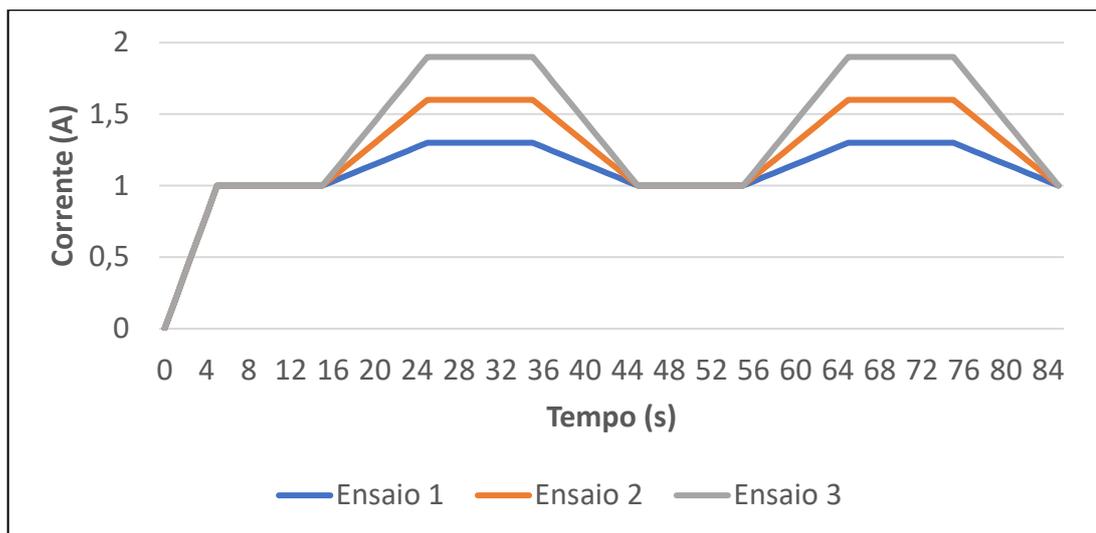
Os ensaios de corrente variável ocorreram de acordo com a seguinte sequência:

- a) A corrente de carga foi aumentada linearmente a uma taxa de 0,2A/s até atingir 1A;

- b) A corrente de carga foi mantida constante por 10 segundos;
- c) A corrente de carga foi incrementada linearmente ao longo de 10s até atingir 1,3A (ensaio 1), 1,6A (ensaio 2) ou 1,9A (ensaio 3);
- d) A corrente de carga foi mantida constante por 10 segundos;
- e) A corrente de carga foi reduzida ao longo de 10s até atingir 1A novamente;
- f) A sequência foi reiniciada a partir do passo b, e se repetiu até que a tensão de fim de descarga foi atingida, momento em que o teste foi interrompido automaticamente pelo algoritmo.

A Figura 17 ilustra o comportamento da corrente ao longo do tempo para cada um dos ensaios:

Figura 17 – Comportamento da corrente nos ensaios de corrente variável



Fonte: Elaboração própria.

Por fim, foram realizados dois ensaios de descarga com a bateria parcialmente carregada. O primeiro deles com aproximadamente 50% da capacidade total e o segundo com cerca de 30%, ambos com descarga constante de 1A.

Os ensaios da etapa de validação não foram realizados em ambiente de temperatura controlada, tendo sido aceita a temperatura natural do ambiente e suas variações durante a realização das medições. A estimativa de estado de carga (%) e do tempo de operação restante (segundos) foram registrados a cada segundo. O erro de cada estimativa foi determinado pela Equação 8:

$$Erro (\%) = \left| \frac{Valorestimado - Valorreal}{Valorreal} \right| \times 100 \quad (8)$$

Onde *Valorestimado* é o tempo de operação restante, em segundos, ou o estado de carga, dado percentualmente, projetado pelo algoritmo e *Valorreal* é o tempo transcorrido a partir da estimativa até a interrupção do ensaio ou, no caso do estado de carga, a quantidade de energia extraída da bateria também até a interrupção do ensaio. O desempenho do sistema durante cada teste foi dado pela média entre os erros registrados ao longo do mesmo, de acordo com a Equação 9:

$$ErroMédio = \frac{Erro1 + Erro2 + \dots + Erro_n}{n} \quad (9)$$

Onde *n* é o número de estimativas realizadas. Esse parâmetro varia de acordo com o tempo de duração do ensaio.

3.5 VALIDAÇÃO DOS SENSORES E FONTES DE ERRO DE MEDIÇÃO

3.5.1 Validação dos sensores

Por não terem um certificado de calibração emitido por um laboratório capacitado, o medidor de tensão e corrente INA226, bem como o sensor de temperatura LM35 passaram por uma etapa de verificação com o objetivo de atestar sua confiabilidade. Para isso, tiveram suas medições comparadas à de equipamentos com certificado de calibração válido.

Inicialmente, foram realizadas medições de 2,5, 3, 3,5, 4 e 4,5V para comparação com um multímetro Minipa ET-1110. Na sequência, medições de corrente de 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 e 5000mA, para comparação com o mesmo multímetro. Por fim, medições de temperatura de 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 27,5, 30, 32,5 e 35°C, e comparação com um termo-higrômetro Akso AK28. Quando necessário, foram realizadas compensações via *software* de modo a garantir resultados compatíveis com os do instrumento de referência.

3.5.2 Fontes de erro de medição de corrente

São consideradas fontes de erro na medição da corrente fornecida pela bateria:

- a) Erro máximo de ganho de tensão *shunt* do sensor INA226, que é de 0,1%, segundo o fabricante;
- b) Tolerância construtiva do resistor *shunt* em relação ao valor nominal, que permite uma variação de $\pm 0,5\%$ a 20°C, segundo o fabricante;
- c) Ruídos e interferências externas, que podem distorcer as medições em uma magnitude que não pode ser determinada;
- d) Variações na resistividade do *shunt* em função de variações de temperatura. Seus limites máximos não são informados pelo fabricante.

Como a saída do INA226 é digital, o erro de leitura dos dados pelo microcontrolador é eliminado. A corrente circulando pelo sistema é dada pela Equação 10:

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (10)$$

Em que V_{shunt} é a queda de tensão sobre o resistor *shunt*, medida pelo sensor INA226 e sujeita ao erro descrito em *a*, e R_{shunt} é a resistência *shunt*, cuja tolerância construtiva é descrita em *b*. O erro máximo ocorre quando V_{shunt} é medido com um erro de $\pm 0,1\%$ e R_{shunt} é construída com variação de $\pm 0,5\%$, havendo nesses casos um erro de 0,6030%, somado do exposto em *c* e *d*.

3.5.3 Fontes de erro de medição da tensão nos terminais da bateria

São consideradas fontes de erro na medição da tensão nos terminais da bateria:

- a) Erro máximo de ganho de tensão do barramento do sensor INA226, que é de 0,1%, segundo o fabricante;
- b) Ruídos e interferências externas, que podem distorcer as medições em uma magnitude que não pode ser determinada.

Novamente, a saída digital do INA226 elimina o erro de leitura dos dados por parte do microcontrolador. O erro máximo é simplesmente 0,1%, somado do exposto em *b*.

3.5.4 Fontes de erro de medição de temperatura

São consideradas fontes de erro na medição de temperatura:

- a) Erro máximo de ganho de medição do sensor LM35, que é de 1°C para a faixa de temperatura a ser estudada, segundo o fabricante;
- b) Erro máximo de leitura nas entradas analógicas do Arduino Nano V3.0, que depende do nível de tensão de alimentação da placa e de eventuais oscilações, sendo, portanto, não informado pelo fabricante;
- c) Conversão do sinal analógico para digital, também no Arduino Nano V3.0. Sua resolução é de $4,8876\text{mV}$, enquanto que o fator de escala do LM35 é de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, o que implica em um erro de leitura de até $0,4888^{\circ}\text{C}$.
- d) Ruídos e interferências externas, que podem distorcer as medições em uma magnitude que não pode ser determinada;
- e) Distribuições não uniformes de temperatura no interior da caixa térmica, que podem fazer com que a temperatura no ponto onde o sensor está posicionado não represente a temperatura média do ambiente;
- f) Auto aquecimento do sensor. Até $0,08^{\circ}\text{C}$, conforme o fabricante.

A soma do exposto em *a*, *c* e *f* pode levar a um erro máximo de $1,5688^{\circ}\text{C}$. Tal erro pode aumentar em função do descrito em *b*, *d* e *e*.

4 RESULTADOS

No decorrer deste capítulo, são demonstrados os resultados encontrados na etapa de obtenção dos dados de caracterização da bateria e, posteriormente, de implementação do algoritmo de gerenciamento da bateria. Os resultados são expressos por meio de gráficos e/ou tabelas, visando o melhor entendimento do leitor, e são analisados e comentados pelo autor, destacando sua relevância para atingir os objetivos propostos. O esquema elétrico do sistema que originou tais resultados se encontra no Apêndice A, e no Apêndice B está disponível uma imagem do protótipo montado.

4.1 CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

O procedimento de validação dos sensores utilizados e posterior calibração, quando necessário, foi realizado de acordo com o descrito no tópico 3.5.1. A Tabela 8 mostra o resultado das medições de tensão:

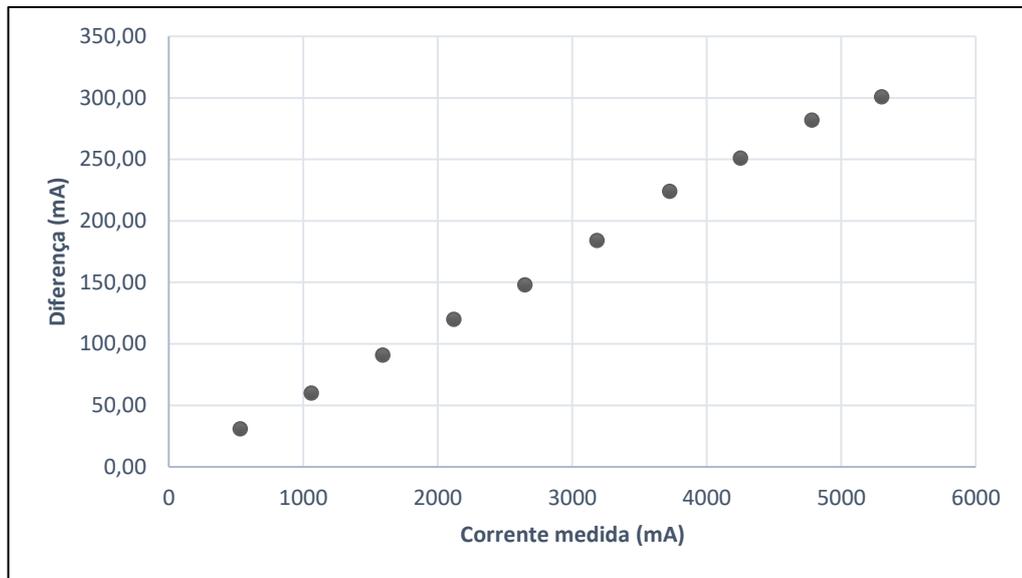
Tabela 8 – Calibração do sensor INA226 (tensão)

Valor de referência (V)	2,5	3	3,5	4	4,5
Valor medido - INA226 (V)	2,5	2,99	3,5	4	4,5
Diferença (V)	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
Diferença (%)	0,00%	-0,33%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração própria

Frente aos resultados, não foi realizada nenhuma compensação no sensor. A Figura 18 mostra a diferença de medição de corrente em relação ao equipamento de referência em diferentes faixas:

Figura 18 – Diferença nas medições do sensor INA226 (corrente)



Fonte: Elaboração própria.

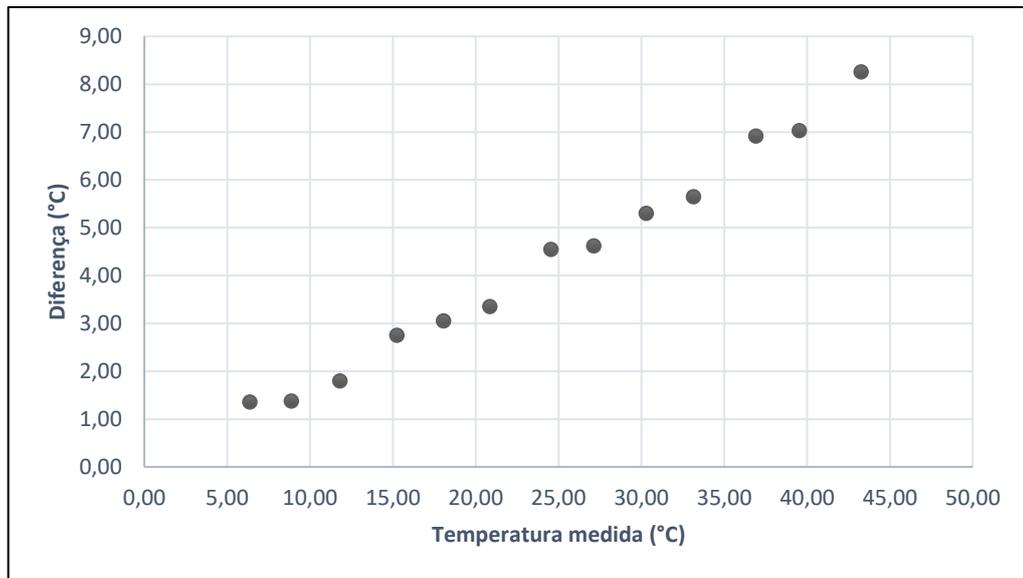
Com o auxílio do *software* Microsoft Excel, foi traçada a linha de tendência correspondente. A Equação 11 representa a diferença das medições realizadas pelo INA226 em relação ao instrumento calibrado, com um R^2 de 0,9977:

$$\text{Diferença INA226 (mA)} = (0,0586 \times I_{\text{medida}}) - 1,7818 \quad (11)$$

Onde *I_{medida}* é a corrente medida pelo INA226, sem qualquer compensação. O valor medido é então subtraído pela diferença, em miliamperes, calculada por meio da Equação 11, sendo essa diferença a medição considerada pelo algoritmo de gerenciamento da bateria.

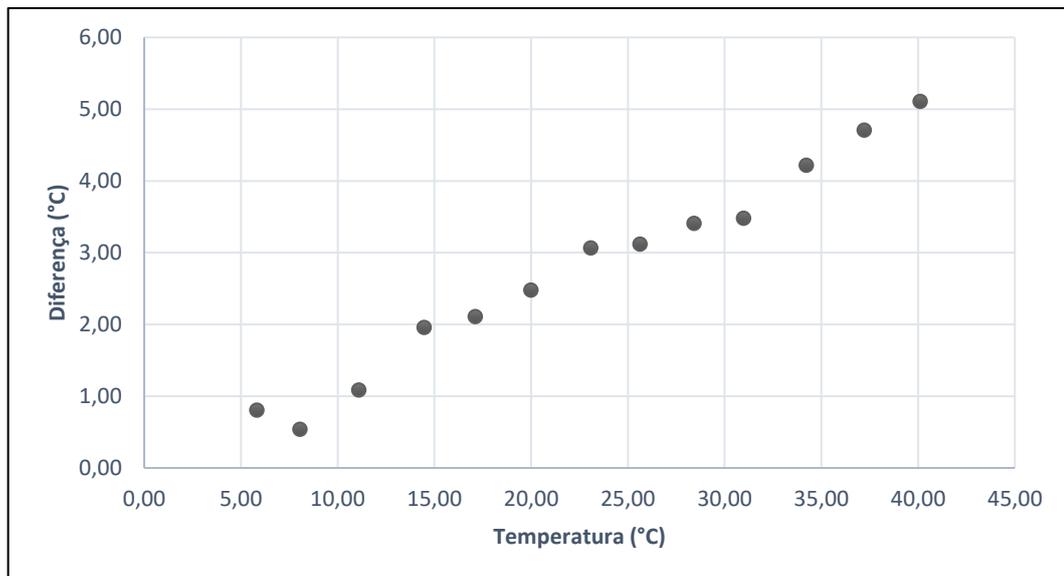
As Figuras 19 e 20 mostram as diferenças de medição de temperatura dos sensores LM35 1 e 2, respectivamente, em relação ao equipamento de referência, em diferentes faixas:

Figura 19 – Diferença nas medições do sensor LM35 1



Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 – Diferença nas medições do sensor LM35 2



Fonte: Elaboração própria.

As Equações 12 e 13 representam as diferenças das medições realizadas pelos sensores LM35 1 e 2 em relação ao instrumento calibrado, com um R^2 de 0,9875 e 0,9809, respectivamente:

$$Diferença \text{ LM35 1 } (^{\circ}\text{C}) = (0,1875 \times T_{medida}) - 0,2479 \quad (12)$$

$$\text{Diferença LM35 2 (}^{\circ}\text{C)} = (0,1287 \times T_{\text{medida}}) - 0,1532 \quad (13)$$

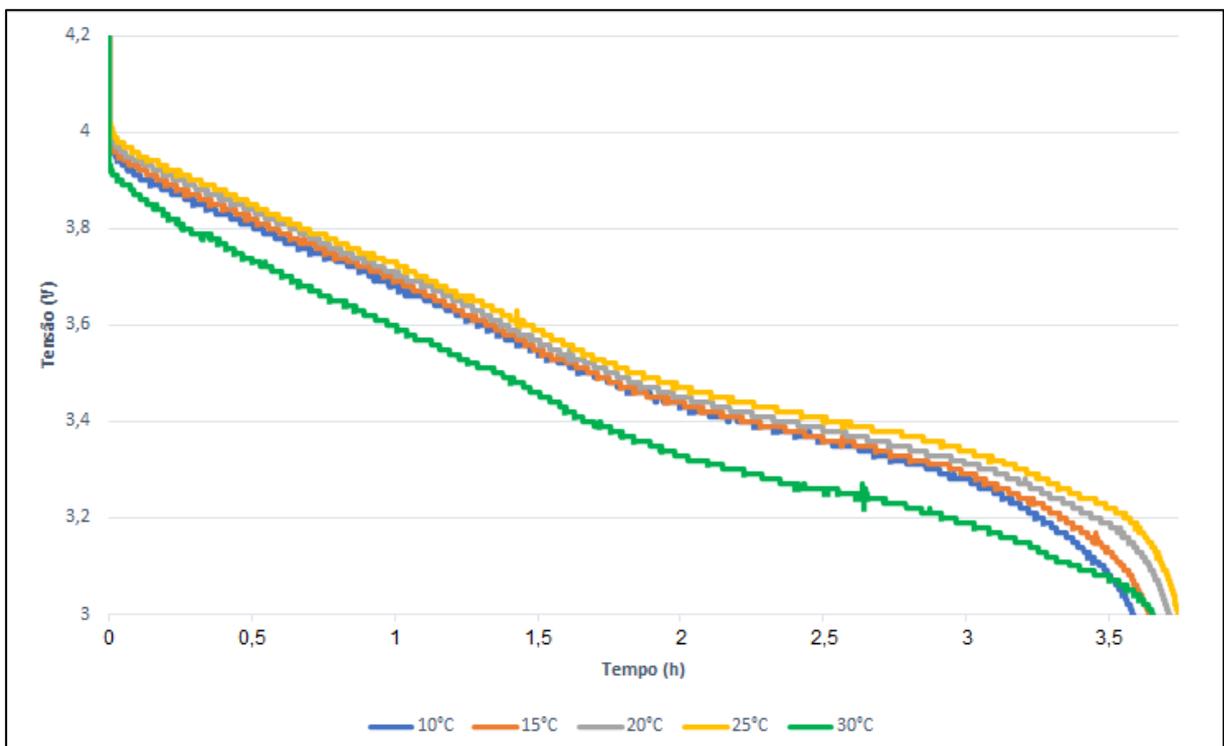
Onde T_{medida} é a temperatura medida por cada um dos sensores, sem qualquer compensação. A compensação é feita do mesmo modo aplicado ao INA226.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA BATERIA

4.2.1 Análise do impacto da temperatura na capacidade de descarga

Para analisar o impacto da temperatura na capacidade de descarga da bateria ICR18650-26F, foram analisados os resultados dos ensaios realizados de acordo com o procedimento descrito no tópico 3.3.3. A Figura 21 mostra a curva de tensão em função do tempo nos terminais da bateria para cada faixa de temperatura, sempre com taxa de descarga de 0,25C (650mA):

Figura 21 – Tensão x tempo para diferentes temperaturas com taxa de descarga de 0,25C



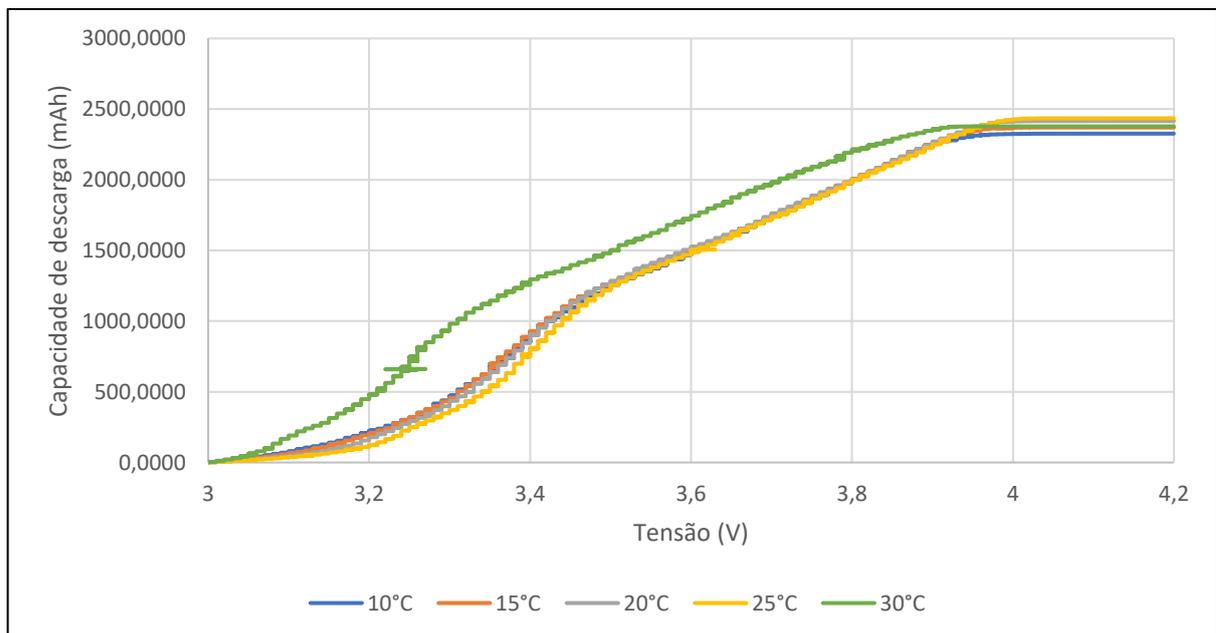
Fonte: Elaboração própria.

O gráfico mostra que, com o aumento da temperatura da bateria, sem ultrapassar os 25°C, a queda de tensão provocada pelo fornecimento de corrente diminui, e o período de tempo em que a bateria é capaz de fornecer a corrente de 650mA aumenta, havendo, portanto, um aumento na capacidade de descarga. Tal comportamento vai de encontro ao explicado em 2.3.2 e com o argumento de PETROVIC (2021), que atribui esse comportamento ao fato de as reações químicas ocorrerem a taxas mais elevadas na medida em que a temperatura aumenta.

O ensaio a 30°C, no entanto, apresentou comportamento contrário, apresentando uma redução de capacidade de descarga. É provável que isso tenha sido causado pelo aumento excessivo da resistência elétrica interna da bateria, consequência indesejada do aumento da temperatura e que aumenta a perda de energia, que passa a ser dissipada em forma de calor, problema explicado no tópico 2.3.1.1, baseado em BUCHMANN (2011).

A Figura 22 mostra a curva de tensão em função da capacidade de descarga desses mesmos ensaios, descritos no tópico 3.3.3:

Figura 22 – Tensão x capacidade de descarga para diferentes temperaturas a 0,25C



Fonte: Elaboração própria.

As curvas demonstram uma relação linear entre a tensão nos terminais da bateria e a capacidade de descarga restante até cerca de 3,5V e, após esse ponto, passa a haver um comportamento exponencial. Os ensaios apontaram que a capacidade de descarga máxima da bateria ocorre a 25°C, em concordância com SAMSUNG (2009).

A Tabela 9 traz informações adicionais a respeito dos testes realizados nessa etapa:

Tabela 9 – Resumo dos ensaios de caracterização da bateria em função da temperatura

Ensaio	Corrente média (mA)	Temperatura média da bateria (°C)	Capacidade de descarga (mAh)	Fator FCT
10°C a 0,25C	648,38	10,05	2325,88	0,9555
15°C a 0,25C	650,54	14,89	2369,05	0,9732
20°C a 0,25C	650,63	20,25	2414,73	0,9920
25°C a 0,25C	650,1	25,06	2434,27	1
30°C a 0,25C	650,55	30,1	2377,21	0,9766

Fonte: Elaboração própria.

Tais resultados mostram um impacto significativo, mas limitado, da temperatura na capacidade da célula. Ainda assim, sugerem que tal parâmetro se torna gradualmente mais relevante na medida em que a operação acontece em temperaturas muito baixas (próximas ou inferiores a 10°C) ou muito altas (acima de 30°C), já considerado elevado para modelos Li-Ion, como destacado por BUCHMANN (2011).

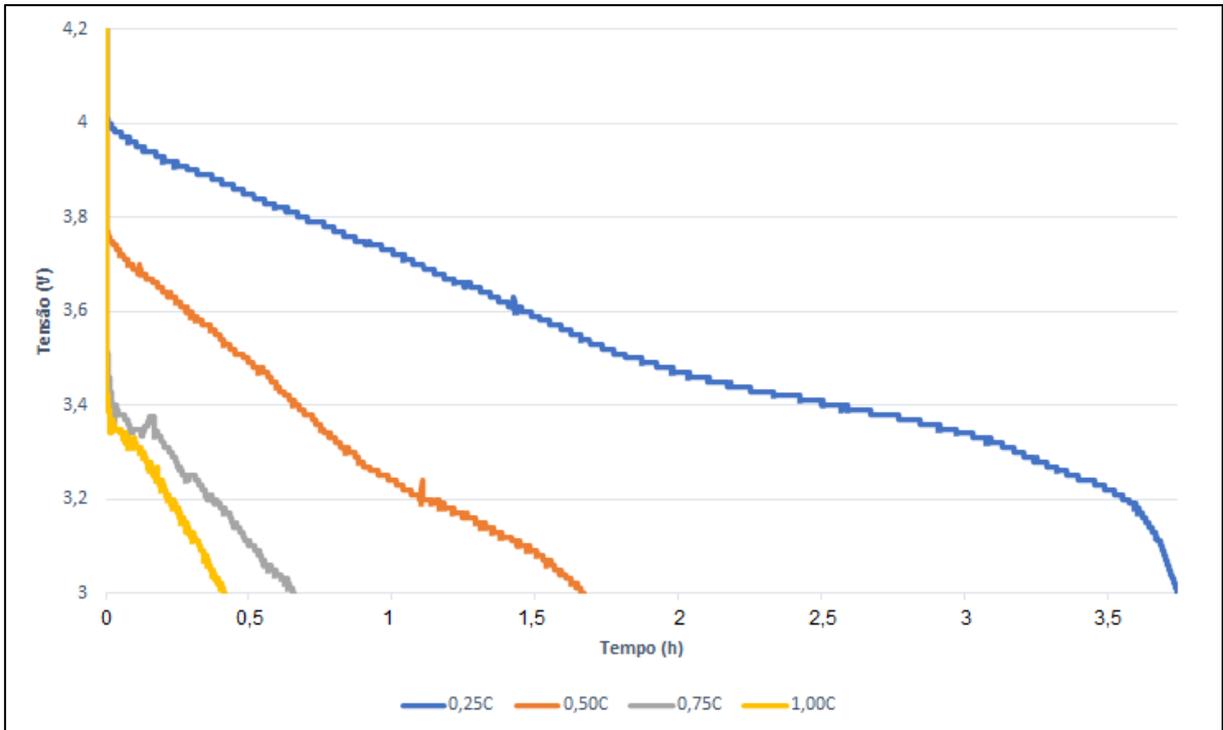
Com base nos dados expressos na Tabela 9, foi gerada a Equação 14, onde T é a temperatura atual, em graus Celsius, utilizada para obtenção do FCT:

$$FCT = -0,0000204 \times T^3 + 0,0009662 \times T^2 - 0,0110050 \times T + 0,9894299 \quad (14)$$

4.2.2 Análise do impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga

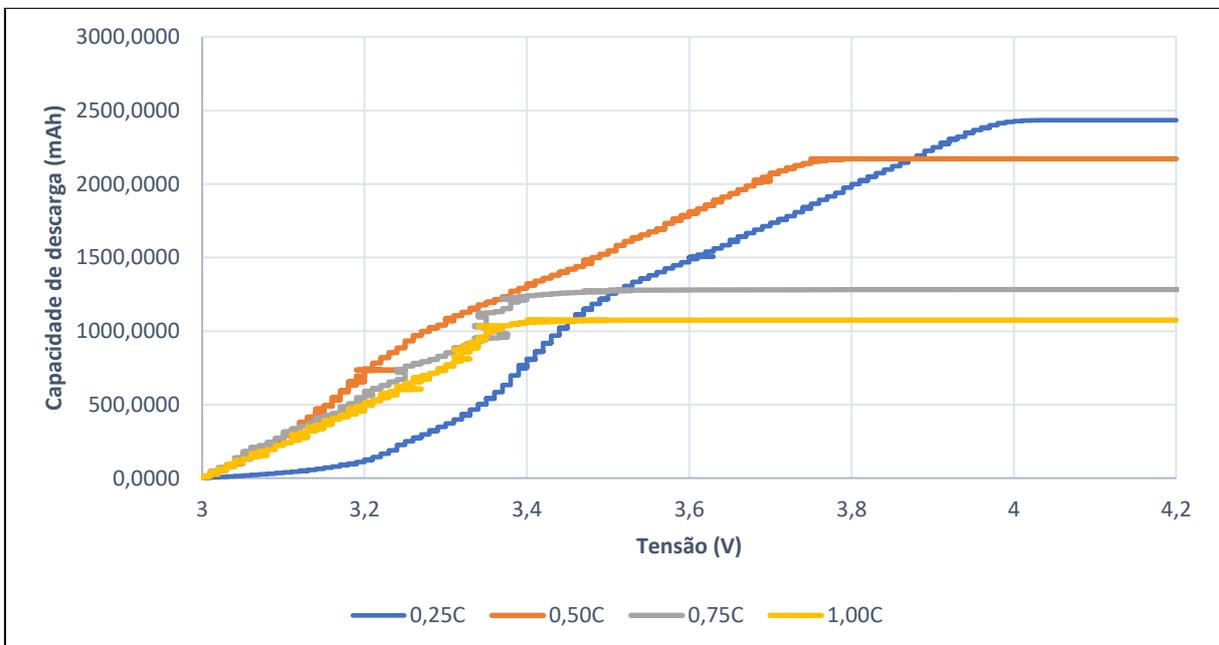
O impacto da taxa de descarga na capacidade de descarga da bateria ICR18650-26F pode ser observado nos resultados dos ensaios realizados de acordo com o procedimento descrito no tópico 3.3.2. A Figura 23 mostra a curva de tensão em função do tempo para cada taxa de descarga, com uma temperatura superficial na bateria controlada em 25°C, e a Figura 24 a curva de tensão em função da capacidade de descarga:

Figura 23 – Tensão x tempo para diferentes taxas de descarga com temperatura de 25°C



Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Tensão x capacidade de descarga para diferentes taxas de descarga a 25°C



Fonte: Elaboração própria.

Os gráficos mostram que, conforme esperado, a capacidade de descarga diminui com o aumento da taxa de descarga. A variação não ocorre de maneira linear: o salto de 0,25C para

0,50C resultou em uma perda de capacidade de 10,8%, enquanto no incremento de 0,50C para 0,75C a redução foi maior, de 41%. No salto para 1,0C, nota-se uma redução de 16,2% quando comparado com a faixa anterior, e 55,85% em relação a 0,25C, indicando que o modelo não é adequado para operar em correntes tão elevadas continuamente.

A Tabela 10 traz informações adicionais a respeito dos testes realizados nessa etapa:

Tabela 10 – Resumo dos ensaios de caracterização da bateria em função da taxa de descarga

Ensaio	Corrente média (mA)	Temperatura média da bateria (°C)	Capacidade de descarga (mAh)	Fator FCD
25°C a 0,25C	650,1	25,06	2434,27	1
25°C a 0,50C	1300,63	25,24	2171,45	0,8920
25°C a 0,75C	1943,51	25,22	1282,18	0,5267
25°C a 1,00C	2591,77	25,28	1074,69	0,4415

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos dados da Tabela 10 foram geradas as equações para obtenção do FCD. Para reduzir a demanda computacional, foram geradas múltiplas equações de primeiro grau, sendo a Equação 15 usada quando a corrente medida é menor ou igual a 0,5C, a Equação 16 quando a corrente é maior que 0,5C e menor ou igual a 0,75C, e a Equação 17 quando a corrente é superior a 0,75C:

$$FCD = -0,43151479 \times C + 1,10789529 \quad (15)$$

$$FCD = -1,47009440 \times C + 1,62743676 \quad (16)$$

$$FCD = -0,34356459 \times C + 0,78396056 \quad (17)$$

Em todas elas, C é a taxa de descarga atual.

4.2.3 Análise da tensão da bateria em função da taxa de descarga e temperatura

Os ensaios descritos na seção 4.2.2 foram também utilizados para gerar a Tabela 11, que atribui uma tensão para diferentes combinações de taxa de descarga e percentual de carga restante:

Tabela 11 – Análise de tensão em função da taxa de descarga e percentual de carga restante

	Corrente de descarga (mAh)			
	0,25	0,5	0,75	1
90%	3,88	3,66	3,38	3,35
80%	3,79	3,58	3,35	3,33
70%	3,69	3,49	3,33	3,3
60%	3,59	3,4	3,26	3,25
50%	3,49	3,3	3,23	3,22
40%	3,44	3,24	3,19	3,17
30%	3,39	3,19	3,14	3,13
20%	3,34	3,14	3,09	3,09
10%	3,25	3,09	3,05	3,05
0%	3	3	3	3

Fonte: Elaboração própria.

Por meio da Tabela 11, foram geradas as Equações 18 a 26, usadas pelo algoritmo para estimar o percentual de carga por meio de medições de tensão. O momento em que a tensão medida nos terminais da bateria for igual ao resultado de uma dessas equações indica que o percentual correspondente a ela é o percentual de carga restante atual na bateria.

$$V(90\%) = 0,76 \times C^2 - 1,698 \times C + 4,2725 \quad (18)$$

$$V(80\%) = 0,76 \times C^2 - 1,594 \times C + 4,1525 \quad (19)$$

$$V(70\%) = 0,68 \times C^2 - 1,382 \times C + 3,9975 \quad (20)$$

$$V(60\%) = 0,72 \times C^2 - 1,364 \times C + 3,89 \quad (21)$$

$$V(50\%) = -0,64 \times C^3 + 1,92 \times C^2 - 1,92 \times C + 3,86 \quad (22)$$

$$V(40\%) = -1,28 \times C^3 + 3,12 \times C^2 - 2,58 \times C + 3,91 \quad (23)$$

$$V(30\%) = -1,1733 \times C^3 + 2,96 \times C^2 - 2,5067 \times C + 3,85 \quad (24)$$

$$V(20\%) = -1,0667 \times C^3 + 2,8 \times C^2 - 2,4333 \times C + 3,79 \quad (25)$$

$$V(10\%) = -0,8533 \times C^3 + 2,24 \times C^2 - 1,9467 \times C + 3,61 \quad (26)$$

Adicionalmente, os ensaios da seção 4.2.1 foram utilizados para uma análise semelhante, mas destinada à avaliação do impacto da temperatura na tensão, resultando na Tabela 12:

Tabela 12 – Análise de tensão em função da temperatura e percentual de carga

	Temperatura (°C)				
	10	15	20	25	30
90%	3,84	3,85	3,87	3,88	3,78
80%	3,76	3,76	3,77	3,79	3,67
70%	3,66	3,67	3,68	3,69	3,57
60%	3,56	3,56	3,57	3,59	3,47
50%	3,47	3,47	3,48	3,49	3,37
40%	3,41	3,41	3,42	3,44	3,3
30%	3,36	3,36	3,37	3,39	3,25
20%	3,3	3,31	3,32	3,34	3,2
10%	3,21	3,22	3,23	3,25	3,16
0%	3	3	3	3	3

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que os valores de tensão apresentados no ensaio a 25°C foram sempre os mais altos para qualquer faixa de percentual de carga. A partir disso, foi gerada a Tabela 13, que traz a relação dos valores encontrados nas medições de 10, 15, 20 e 30°C em relação à medição de 25°C:

Tabela 13 – Análise relativa de tensão em função da temperatura e percentual de carga

	Temperatura (°C)				
	10	15	20	25	30
90%	0,9897	0,9923	0,9974	1	0,9742
80%	0,9921	0,9921	0,9947	1	0,9683
70%	0,9919	0,9946	0,9973	1	0,9675
60%	0,9916	0,9916	0,9944	1	0,9666
50%	0,9943	0,9943	0,9971	1	0,9656
40%	0,9913	0,9913	0,9942	1	0,9593
30%	0,9912	0,9912	0,9941	1	0,9587
20%	0,9880	0,9910	0,9940	1	0,9581
10%	0,9877	0,9908	0,9938	1	0,9723
0%	1	1	1	1	1
Média	0,9909	0,9921	0,9952	1,0000	0,9656

Fonte: Elaboração própria.

O valor relativo médio encontrado em cada faixa de temperatura foi utilizado para gerar a Equação 27, utilizada para corrigir as equações 18 a 26 em função da temperatura:

$$FCT_{tensão} = -0,0000027041 \times C^4 + 0,00018898 \times C^3 - 0,00474959 \times C^2 + 0,05118931 \times C + 0,79196612 \quad (27)$$

Por fim, os valores expostos na coluna de 0,5C da Tabela 11 foram utilizados para gerar a equação de determinação da carga inicial da bateria. Como se observou uma queda de tensão de 0,22V com uma descarga a 0,5C (650mA), todos os valores foram acrescidos com 0,22, resultando nas Equações 28 e 29:

$$\%Inicial = 102,313522 \times V - 329,820503 \quad (28)$$

$$\%Inicial = 270,05 \times V^2 - 1768,69 \times V + 2895,22 \quad (29)$$

Onde V é a tensão medida nos terminais da bateria sem carga. A Equação 28 é utilizada quando a tensão é maior ou igual a 3,71V, e a Equação 29 nos demais casos.

4.3 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Neste tópico, são analisados os resultados dos testes descritos na seção 3.4.2. A partir deles, são tiradas as conclusões a respeito da funcionalidade do sistema e da metodologia proposta.

4.3.1 Ensaio de validação do sistema com corrente constante

Os testes realizados nessa etapa mostraram que os pontos de calibração por tensão, dispostos a cada 10% de descarga da bateria, não apresentaram o grau de confiabilidade esperado. A Tabela 14 mostra o comparativo entre as estimativas geradas por contagem de Coulomb aliadas aos fatores de correção por temperatura e taxa de descarga, e as estimativas geradas por medição de tensão, com uma corrente de descarga de 1A:

Tabela 14 – Comparativo entre contagem de Coulomb e medição de tensão, descarga de 1A

% de carga restante dado por medições de tensão e corrente + FCT	% de carga restante dado por contagem de Coulomb + FCT + FCD	% de carga restante real
90	77,34	78,47
80	67,70	69,32
70	57,86	59,98
60	46,88	49,58
50	28,71	32,35
40	17,58	21,80
30	10,22	14,83
20	3,84	8,78
10	0	4,41

Fonte: Elaboração própria.

O percentual de carga restante real relaciona o consumo acumulado até determinada medição em relação ao consumo total registrado no momento do encerramento do teste. Os valores expressos deixam clara a imprecisão das estimativas baseadas em medições de tensão, que apresentaram diferença superior a 10% em relação ao valor real de carga em todas as faixas. Com o método de contagem de Coulomb, a diferença em relação à capacidade restante real se

reduziu de maneira expressiva, embora se observe uma tendência de aumento do erro com o passar do teste, indo de acordo com a afirmação de Barrera, Galeano e Maldonado (2017) que explicam, conforme disposto no tópico 2.5.2, que por se tratar de um sistema de medição de *loop* aberto, os erros se acumulam e tornam a medição menos confiável com o passar do tempo.

As Tabelas 15 e 16 mostram o resultado do ensaio com correntes de descarga de 1,4A e 1,8A, respectivamente:

Tabela 15 – Comparativo entre contagem de Coulomb e medição de tensão, descarga de 1,4A

% de carga restante dado por medições de tensão e corrente + FCT	% de carga restante dado por contagem de Coulomb + FCT + FCD	% restante real
90	78,74	78,98
80	66,94	67,25
70	56,34	56,71
60	45,49	45,93
50	28,10	28,66
40	17,15	17,79
30	9,24	9,92
20	3,69	4,39
10	0	0,44

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 16 – Comparativo entre contagem de Coulomb e medição de tensão, descarga de 1,8A

% de carga restante dado por medições de tensão e corrente + FCT	% de carga restante dado por contagem de Coulomb + FCT + FCD	% restante real
90	81,12	80,69
80	72,68	72,18
70	63,82	63,25
60	50,78	50,07
50	42,59	41,84
40	34,57	33,71
30	26,04	25,10
20	16,12	14,98

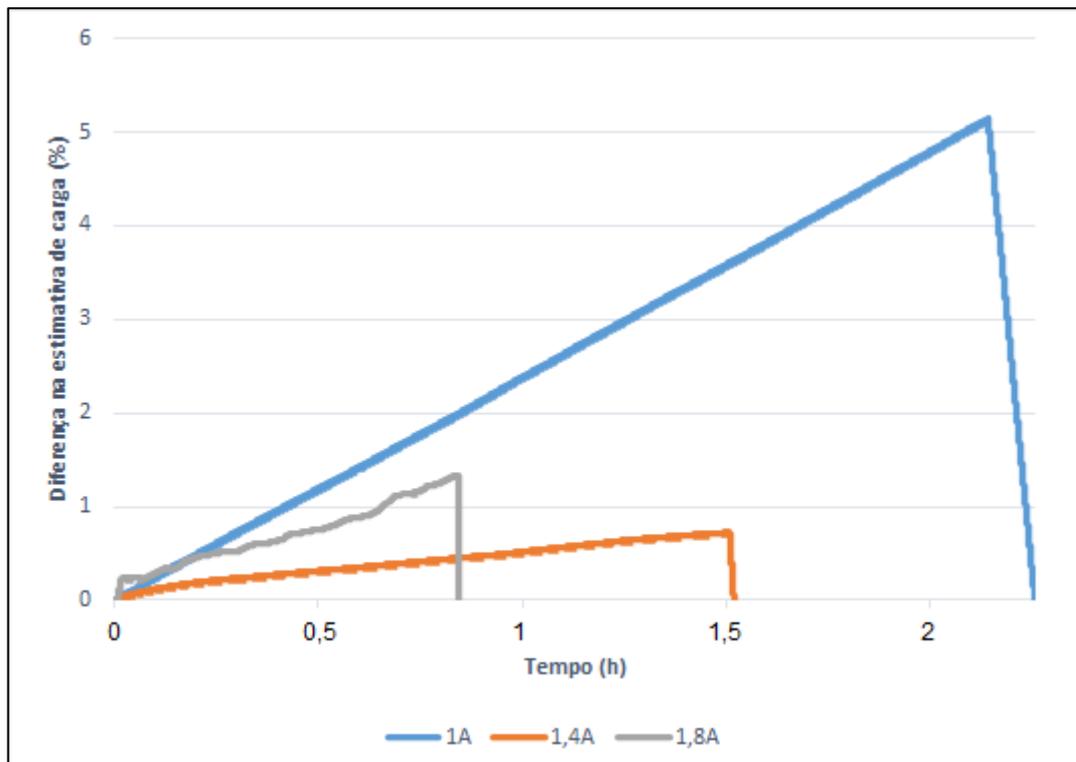
% de carga restante dado por medições de tensão e corrente + FCT	% de carga restante dado por contagem de Coulomb + FCT + FCD	% restante real
10	5,16	3,86

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados convergem com os obtidos no ensaio a 1A e reafirmam que as estimativas realizadas por tensão nos terminais da bateria não foram confiáveis. Com isso, o algoritmo se utilizou somente das medições de corrente (método de contagem de Coulomb) e das compensações por taxa de descarga (FCD) e de temperatura (FCT), propostas para realização das estimativas de estado de carga da bateria.

A Figura 25 mostra a diferença entre o percentual de carga real da bateria e o percentual estimado pelo algoritmo a cada segundo, para os testes de corrente constante de 1000, 1400 e 1800mA:

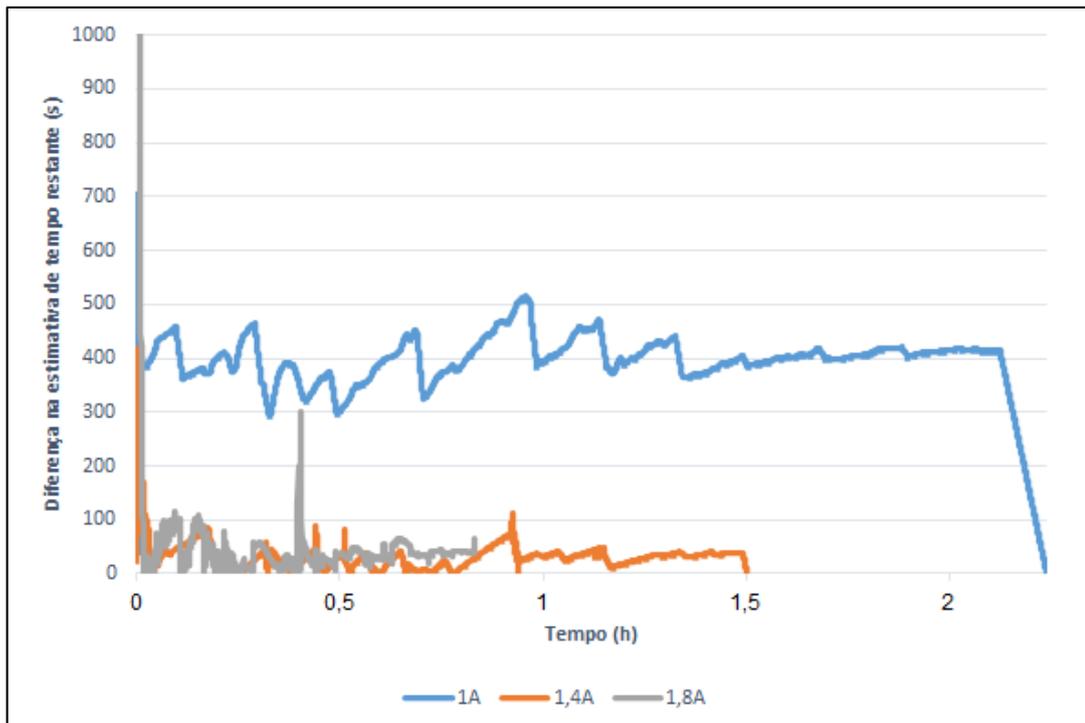
Figura 25 – Diferença entre as estimativas e a carga restante real, descargas de 1, 1,4 e 1,8A



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 26 mostra a diferença entre o tempo de operação restante real e o estimado pelo algoritmo a cada segundo, também para os testes de corrente constante de 1000, 1400 e 1800mA:

Figura 26 – Diferença entre as estimativas e o tempo de operação restante real, descargas de 1, 1,4 e 1,8A



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 17 traz informações adicionais dos ensaios realizados nessa etapa:

Tabela 17 – Informações adicionais dos ensaios de corrente constante

	Erro médio na estimativa de carga (%)	Erro máximo na estimativa de carga (%)	Erro médio na estimativa de tempo restante (s)	Erro máximo na estimativa de tempo restante (s)
1A	2,56	5,14	391,57	705
1,4A	0,41	0,73	32,25	419
1,8A	0,71	1,34	66,13	7167

Fonte: Elaboração própria.

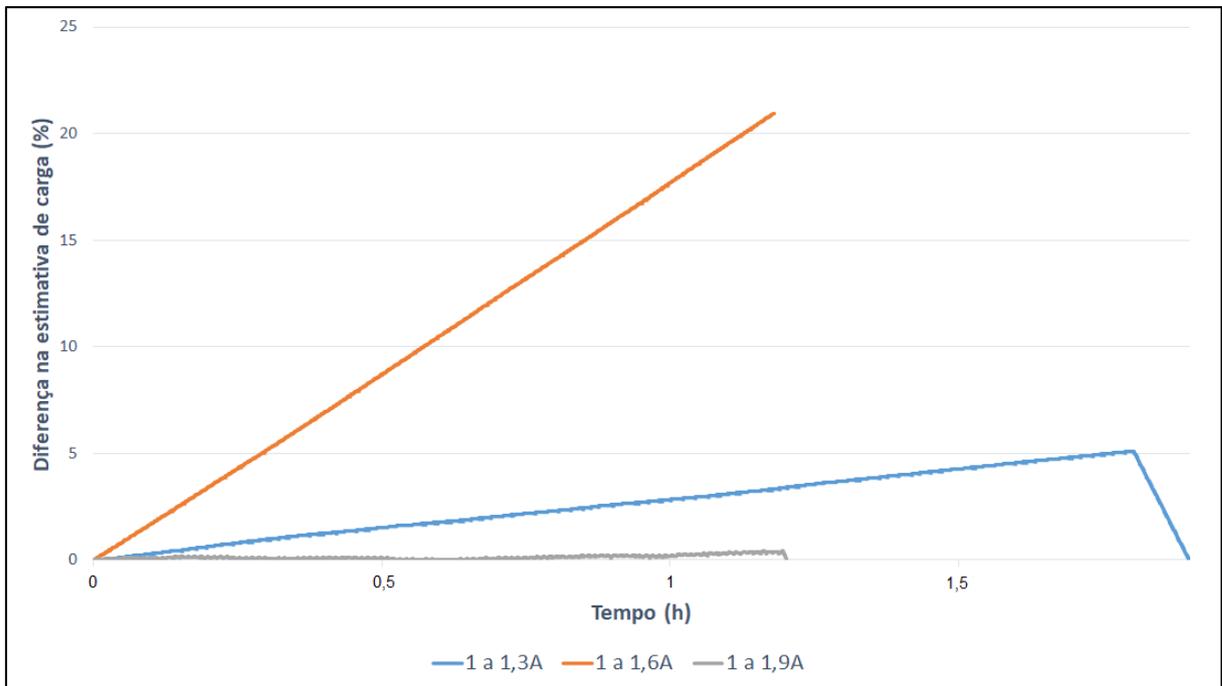
O erro médio registrado pelo algoritmo nas estimativas de percentual de carga restante é considerado bastante satisfatório e dentro do esperado. Como não foi possível realizar compensações em função das medições de tensão, o erro sofreu um acúmulo e atingiu os valores mais altos sempre ao final dos testes.

As estimativas de tempo de operação restante apresentaram oscilação considerável, mas com erro médio constante ao longo dos ensaios, já que se basearam na demanda de energia da bateria registrada nos 60 segundos anteriores à estimativa, o que também justifica a existência de estimativas de tempo somente a partir de um minuto após o início dos ensaios. Os erros máximos nas estimativas de tempo restante ocorreram sempre no início dos testes, já que o algoritmo ainda não tinha uma média de corrente de carga confiável. O erro máximo no ensaio de 1,8A chama a atenção, mas foi causado simplesmente porque a carga demorou mais para ser acionada do que nos demais ensaios, fazendo com que o consumo de corrente médio considerado fosse baixo durante as primeiras estimativas.

4.3.2 Ensaios de validação do sistema com corrente variável

Os ensaios com corrente variável visam avaliar o comportamento do sistema em condições mais próximas às encontradas em uma aplicação real, com maior grau de imprevisibilidade. A Figura 27 mostra a diferença entre o percentual de carga real da bateria e o percentual estimado pelo algoritmo a cada segundo, para os testes de corrente variável entre 1000mA e 1300mA (teste 1), 1600mAh (teste 2) e 1900mA (teste 3):

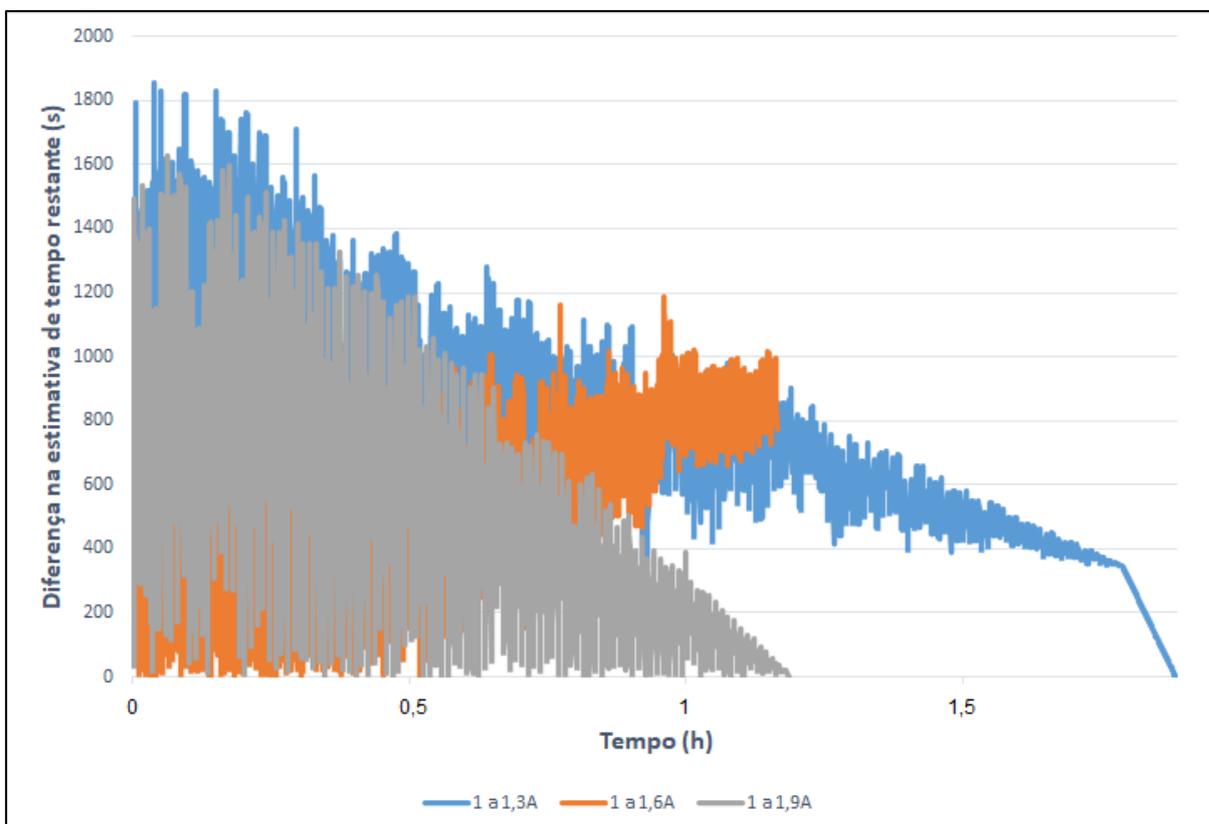
Figura 27 – Diferença entre as estimativas e a carga restante real, descargas entre 1 e 1,3/1,6/1,9A



Fonte: Elaboração própria.

O ensaio com corrente até 1,9A apresentou o menor erro ao longo do teste, não chegando a 1% em nenhum momento. O ensaio até 1,3A apresentou erro um pouco maior, chegando a um erro máximo de 5,12%, enquanto o de corrente até 1,6A resultou em um erro máximo de mais de 20, o pior resultado encontrado. A Figura 28 mostra a diferença entre o tempo de operação restante real e o estimado pelo algoritmo a cada segundo, para esses mesmos ensaios:

Figura 28 – Diferença entre as estimativas e o tempo de operação restante real, descargas entre 1 e 1,3/1,6/1,9A



Fonte: Elaboração própria.

As estimativas de tempo de operação restante se mostraram menos confiáveis do que as realizadas nos ensaios com corrente constante, o que pode ser explicado pela maneira com que essa estimativa é gerada. O sistema precisa considerar a média das últimas medições de corrente realizadas para prever as futuras medições de corrente, o que se torna mais complexo quando as medições sofrem grandes oscilações.

Também é necessário definir até onde o algoritmo irá retornar nas medições passadas de corrente para realizar o cálculo de corrente média. Considerar um grande número de medições anteriores pode reduzir a oscilação nas estimativas, mas torna a resposta do algoritmo mais lenta, pois o valor de corrente média demora mais para se elevar, enquanto o uso de um número menor de medições passadas causa o efeito contrário.

O erro elevado do teste com corrente entre 1 e 1,6A pode ser atribuído à dois fatores principais: a capacidade de descarga inferior ao esperado proporcionado pela bateria e a indisponibilidade de pontos de ajuste acionados por medições de tensão. É possível demonstrar o primeiro fator pela comparação da capacidade de descarga obtida nos testes 2 (até 1,6A) e 3

(até 1,9A): 1526,74mAh e 1717,89mAh, respectivamente. Considerando que os ensaios foram realizados em condição similar de temperatura, o teste 2, com menor corrente de carga quando comparado ao teste 3, deveria ter apresentado melhor capacidade de descarga, conforme verificado durante os ensaios de caracterização e evidenciado na Tabela 10.

A Tabela 18 traz informações adicionais a respeito dos ensaios:

Tabela 18 – Informações adicionais dos ensaios de corrente variável

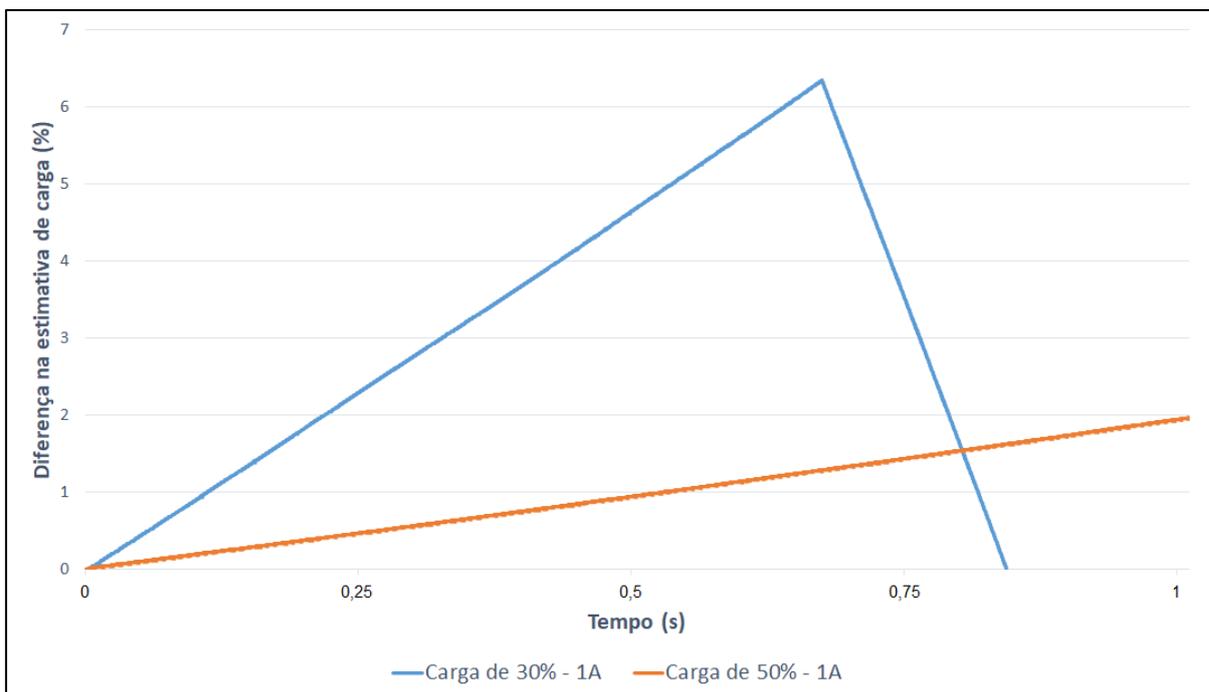
	Erro médio na estimativa de carga (%)	Erro máximo na estimativa de carga (%)	Erro médio na estimativa de tempo restante (s)	Erro máximo na estimativa de tempo restante (s)
1 a 1,3A	2,59	5,12	786,32	1853
1 a 1,6A	10,37	20,95	532,71	1437
1 a 1,9A	0,14	0,43	500,63	1629

Fonte: Elaboração própria.

4.3.3 Ensaio de validação do sistema com carga parcial

Os ensaios realizados nessa seção têm como objetivo avaliar a capacidade do algoritmo de estimar a condição de uma bateria parcialmente carregada, condição de uso comum em uma aplicação real. A Figura 29 mostra a diferença entre o percentual de carga real da bateria e o percentual estimado pelo algoritmo a cada segundo, para dois ensaios, um com aproximadamente 50% da carga total, e outro com cerca de 30%, ambos com descarga constante de 1A:

Figura 29 – Diferença entre as estimativas e a carga restante real, carga parcial de 30 e 50%

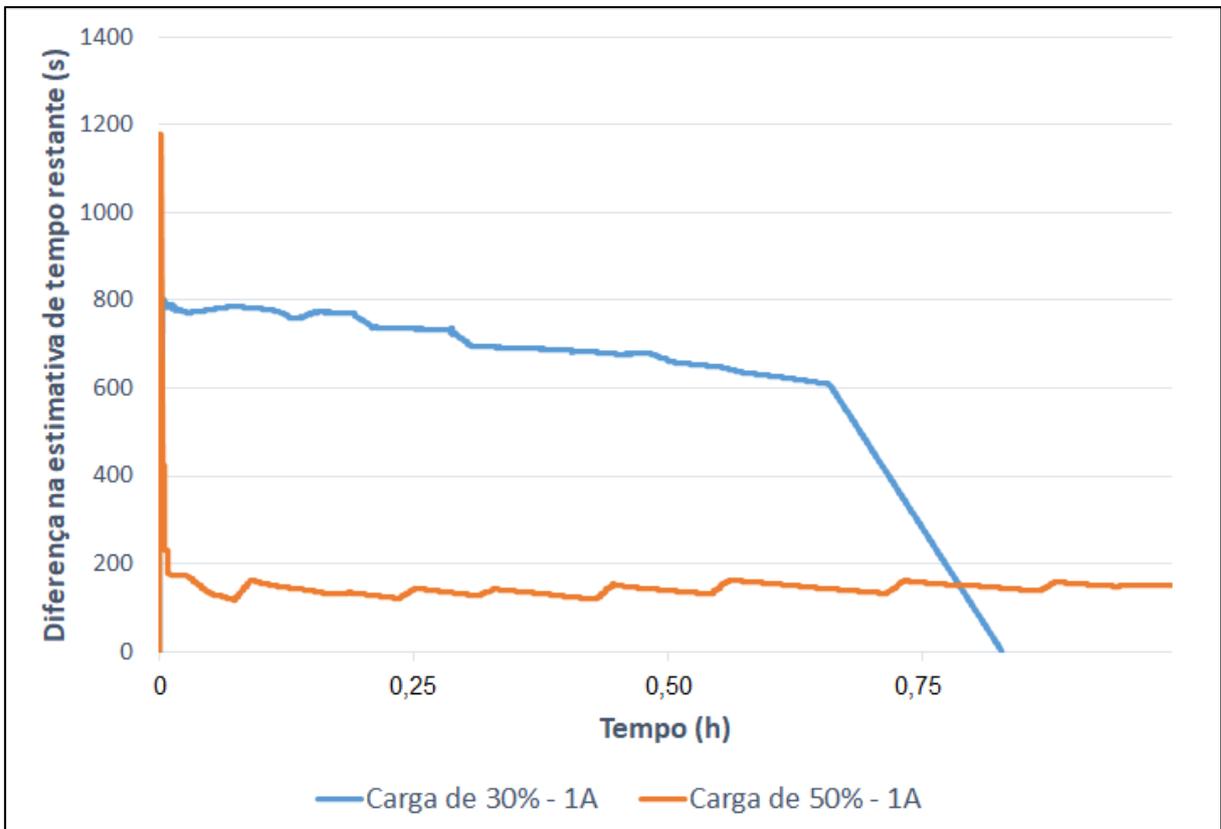


Fonte: Elaboração própria.

Considerando-se que o ensaio de descarga a 1A realizado anteriormente com carga completa resultou em um erro máximo de 5,14%, e que o erro máximo dos resultados dos ensaios com carga parcial é de 6,34%, considera-se que o sistema é capaz de estimar o estado de carga inicial sem causar grandes variações nas estimativas de erro, com um aumento de 1,2% no erro máximo e de 0,44% no erro médio global, que considera a média de todas as estimativas realizadas em todos os ensaios. Também é um indício, embora inconclusivo, que no modelo de bateria utilizado, estimativas de estado de carga por medições de tensão apresentam maior grau de confiabilidade quando realizadas com correntes de carga baixas (a medição de estado de carga inicial é realizada com uma corrente de aproximadamente 30mA).

A Figura 30 mostra a diferença entre o tempo de operação restante real e o estimado pelo algoritmo a cada segundo, para esses mesmos ensaios de carga parcial:

Figura 30 – Diferença entre as estimativas e o tempo de operação restante real, carga parcial de 30 e 50%



Fonte: Elaboração própria.

No caso do ensaio com carga de 30%, nota-se um erro mais elevado nas estimativas de tempo, em função do erro maior na estimativa do estado de carga. No segundo ensaio, obteve-se um erro menor, com média de 146,8 segundos, também em função do menor erro na estimativa do estado de carga.

A Tabela 19 traz informações adicionais dos ensaios de carga parcial:

Tabela 19 – Informações adicionais dos ensaios de carga parcial

	Erro médio na estimativa de carga (%)	Erro máximo na estimativa de carga (%)	Erro médio na estimativa de tempo restante (s)	Erro máximo na estimativa de tempo restante (s)
30% - 1A	3,13	6,34	624,38	803
50% - 1A	0,96	1,96	146,8	1180

Fonte: Elaboração própria.

Os erros médios encontrados são comparáveis aos encontrados nos ensaios de corrente constante detalhados na Tabela 17, indicando que o uso de baterias parcialmente carregadas não altera de maneira significativa o desempenho do algoritmo. Isso também pode ser demonstrado pelo erro médio percentual a cada segundo, considerando ambos os ensaios, que ficou em 1,95%.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de bateria com alto grau de confiabilidade requer a análise, medição e tratamento de múltiplos parâmetros, que somados podem causar grande influência na capacidade de descarga da célula. Enquanto sistemas primitivos operavam baseando-se em medições de tensão e corrente, dispositivos modernos começam a considerar outros critérios, como temperatura, taxa de descarga e até análises químicas no interior da bateria para gerar estimativas mais confiáveis.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa monografia foram contextualizados os principais métodos de análise do estado de carga de uma bateria: medições de tensão de circuito aberto ou de carga, contagem de Coulomb, filtro de Kalman e redes neurais, cada um deles com diferentes requisitos computacionais e grau de complexidade. Se propôs desenvolver um sistema baseado em contagem de Coulomb (medições de corrente), apoiado por medições de tensão e com correções baseadas em temperatura e taxa de descarga.

A etapa de realização dos ensaios de caracterização mostrou que o impacto da temperatura da bateria na capacidade de descarga na faixa avaliada (10 a 30°C) é limitado, com uma variação máxima de 4,45%, conforme evidenciado na Tabela 9. Já a taxa de descarga causou variações muito mais expressivas, sendo que no modelo de bateria avaliado, a descarga a uma taxa de 1C (2600mA, para esse modelo) gerou uma redução de 55,86% na capacidade de descarga, quando comparado a uma descarga de 0,25C (650mA). Tudo isso evidenciou a necessidade de considerar tais parâmetros no desenvolvimento de um sistema eficaz de gerenciamento de bateria.

Durante a realização dos ensaios de validação do sistema, notou-se que as medições de tensão, cujos resultados seriam utilizados para validar o estado de carga periodicamente e evitar o acúmulo exagerado de erro inerente ao método de contagem de Coulomb, se mostraram pouco confiáveis e apresentaram erros sempre superiores aos obtidos por medições de corrente e com a aplicação dos fatores de correção por temperatura e taxa de descarga. Por esse motivo, optou-se por desconsiderar tais medições.

Ainda assim, a não utilização das medições de tensão não impediu o sistema de apresentar resultados satisfatórios na maioria dos cenários avaliados. O método proposto, com aplicação dos fatores já citados a cada medição, apresentou erro médio de estimativa de carga inferior a 1% em dois dos três experimentos com corrente constante realizados, e inferior a 2,6% em todos eles. O erro médio global (considerando todas as medições dos três ensaios) foi de 1,51%.

Nos ensaios com carga parcial na bateria e descarga com corrente também constante, o maior erro médio foi de 3,13%. O erro médio global foi de 1,95%, comparável ao obtido nos ensaios com carga completa.

Durante as medições com corrente variável, encontrou-se o pior resultado, com a descarga variando entre 1 e 1,6A apresentando um erro médio de 10,37% e máximo de 20,95%. O erro médio global também foi o maior, de 4,05%. Esse aumento do erro tem relação com o mecanismo que determina o final do ensaio, em outras palavras, o ponto em que a bateria é considerada totalmente descarregada, que é considerado quando a tensão nos terminais da bateria permanece abaixo de 3V por 3 segundos consecutivos. A variação de corrente praticada nesses ensaios gerou variações expressivas de tensão, o que pode causar um fim prematuro do ensaio para evitar danos à bateria.

A comparação com projetos similares pode ser utilizada como referência, mas não permite tirar conclusões absolutas pelas condições em que cada um foi idealizado e testado. O artigo de Kim, Choi, Jeon, Kang e Cha (2020) afirma ter obtido erros inferiores a 3%, considerando-se somente o instante em que a bateria atinge a tensão de final de descarga, mas não especifica em que condições de descarga os testes foram realizados. Considerando o erro máximo encontrado em cada ensaio realizado, o algoritmo desenvolvido nesse trabalho apresentou um erro máximo médio de 2,40% nos ensaios com corrente constante, 8,83% nos ensaios com corrente variável e 4,15% nos de carga parcial.

Já o artigo de Cheng, Yi, Liang, Song e Liu (2020) utiliza o erro médio absoluto, considerando todas as medições realizadas. Os autores afirmam apenas ter obtido um erro médio de 1,038% em uma simulação de descarga, resultado superior ao encontrado em alguns dos ensaios realizados nesse trabalho, e inferior a outros. Guo e He (2020) informam ter obtido um erro de cerca de 1,5% com seu sistema, sem detalhar como esse cálculo foi realizado e com isso impedindo comparações diretas.

Com relação aos objetivos propostos nos tópicos 1.2 e 1.3, o sistema foi desenvolvido de acordo com as condições propostas e de acordo com o princípio de funcionamento descrito

inicialmente. Os ensaios de caracterização foram capazes de mostrar o impacto da temperatura e taxa de descarga na capacidade de descarga da bateria, sendo que somente o fator de correção por envelhecimento (FCE) não pôde ser implementado na prática em função da necessidade da realização de centenas de ensaios, tendo sido esse debatido de maneira teórica na seção 2.3.3. O sistema implementado apresentou baixa demanda computacional, conforme previsto, o que pode ser evidenciado pela possibilidade de execução em uma plataforma Arduino com microprocessador ATmega328 de 8 bits.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados iniciais satisfatórios, diversas melhorias podem ser implementadas no sistema proposto. Nesta perspectiva, propõem-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Desenvolver um mecanismo de limitação de corrente de carga para ativação na fase final de descarga da bateria, evitando quedas abruptas de tensão por elevações de corrente que podem forçar o desligamento do sistema para proteção da bateria.
- b) Desenvolver um mecanismo de estimativa do estado de carga baseado por tensão confiável e que permita limitar o acúmulo de erro inerente ao método proposto.
- c) Realizar testes em um modelo de bateria de alta capacidade de descarga, avaliando se os resultados aqui obtidos são aplicáveis a outros tipos de bateria.
- d) Acoplar o sistema em um drone e realizar testes de descarga durante um voo real.
- e) Adaptar o método para uso em sistemas com múltiplas baterias associadas em série.

REFERÊNCIAS

ANAC. **Classe de Drones (RPA)**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/classes-de-drones>>. Acesso em: 16 set. 2021.

ARDUINO. **Arduino Nano**. c2021. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/hardware/nano>>. Acesso em: 17 out. 2021.

ARIS, Asma M.; SHABANI, Bahman. **An experimental study of a lithium ion cell operation at low temperature conditions**. 2016. Em: 1st International Conference on Energy and Power, Melbourne. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/316370542_An_Experimental_Study_of_a_Lithium_Ion_Cell_Operation_at_Low_Temperature_Conditions/fulltext/58fc01fea6fdccde989500bf/An-Experimental-Study-of-a-Lithium-Ion-Cell-Operation-at-Low-Temperature-Conditions.pdf>. Acesso em: 12 set. 2021.

AYAZ, Ahsan; RASHEED, Ashhad. **Multi-Objective Design Optimization of Multicopter Using Genetic Algorithm**. 2021. Em: 18th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST), Pakistan. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9393244>>. Acesso em: 16 set. 2021.

BARRERA, Juan P. R.; GALEANO, Nicolás M.; MALDONADO, Henry O. S. **SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges**. 2017. Em: MDPI Electronics Journal. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321261211_SoC_Estimation_for_Lithium-ion_Batteries_Review_and_Future_Challenges>. Acesso em: 18 set. 2021.

BOYLE, Michael J. **The Drone Age – How Drone Technology Will Change War and Peace**. Nova York: Oxford University Press, 2020.

BUCHMANN, Isidor. **Batteries in a Portable World – A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers, Third Edition**. British Columbia, Canada: Cadex Electronics Inc., 2011.

ÇABUK, Umut C.; TOSUN, Mustafa; JACOBSEN, Rune H.; DAGDEVIREN, Orhan. **A Holistic Energy Model for Drones**. 2020. Em: 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Istanbul, Turquia. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9302218>>. Acesso em: 22 ago. 2021.

CASA. **Types of Drone**. 2021. Disponível em: <<https://www.casa.gov.au/drones/rules/drone-types>>. Acesso em: 16 set. 2021.

CHENG, Wanqing; YI, Zhiheng; LIANG, Jun; SONG, Yuchen; LIU, Datong. **An SOC and SOP Joint Estimation Method of Lithium-ion Batteries in Unmanned Aerial Vehicles**. 2020. Em: 2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). Disponível em:

<<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9261659>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

CHRISTIANSON, Clinton C.; BOURKE, Robert F. **Battery State of Charge Gauge**. 1975. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/6a/c8/8f/be9eb3368d5c54/US3946299.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2021.

CHUANGFENG, Huai; PINGAN, Liu; XUEYAN, Jia. **Measurement and analysis for lithium battery of high-rate discharge performance**. 2011. Em: *Procedia Engineering* 15, Brazil. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/271891206_Measurement_and_analysis_for_lithium_battery_of_high-rate_discharge_performance/fulltext/55d9428f08aed6a199a8a3c9/Measurement-and-analysis-for-lithium-battery-of-high-rate-discharge-performance.pdf>. Acesso em: 12 set. 2021.

DECEA. **Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**. 2020. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/api/storage/uploads/files/75a09bfd-5e5d-4f9a-b4485ccd3fd4627a.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2021.

ERTAS, Atila; JONES, Jesse C. **The Engineering Design Process**. Nova York: Wiley, 1993.

GUO, Dong; HE, Liangzong. **A Novel Algorithm for SOC using Simple Iteration and Coulomb Counting Method**. 2018. Em: 2018 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8624911&tag=1>>. Acesso em: 04 nov. 2021.

HEYER, Benjamin F. W. **One Meter Battery Tester**. 1938. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/41/53/8a/3bab0e05f902f1/US2225051.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2021.

JIANG, Jiuchun; ZHANG, Caiping. **Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles**. Singapura: Wiley, 2015.

KIM, Jiwon; CHOI, Yonghun; JEON, Seunghyeok; KANG, Jaeyun; CHA, Hojung. **Optrone: Maximizing Performance and Energy Resources of Drone Batteries**. 2020. Em: *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol 39. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9211406>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

KUMAR, K. S. R.; SASTRY, V. V.; SEKHAR, Obbu C.; MOHANTA, D. K.; RAJESH, D.; VARMA, M. P. C. **Design and fabrication of coulomb counter for estimation of SOC of battery**. 2016. Em: 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7914473&tag=1>>. Acesso em: 03 out. 2021.

LAIN, Michael J.; KENDRICK, Emma. **Understanding the limitations of lithium ion batteries at high rates**. 2021. Em: *Journal of Power Sources* 493, Brazil. Disponível em: <

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775321002330/pdf?isDTMRedir=true&download=true>>. Acesso em: 11 set. 2021.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. **Handbook of Batteries, Third Edition**. Nova York: McGraw-Hill, 2002.

MARINS, João L.; CABREIRA, Tauã M.; KAPPEL, Kristofer S.; FERREIRA JR, Paulo R. **A Closed-form Energy Model for Multi-Rotors Based on the Dynamic of the Movement**. 2018. Em: VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC), Brazil. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8691921>>. Acesso em: 22 ago. 2021.

MATTS ELECTRONICS. **SX1308**. 201-. Disponível em: < <https://www.matts-electronics.com/wp-content/uploads/2018/06/SX1308.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2022.

MIT Electric Vehicle Team. **A Guide to Understanding Battery Specifications**. 2008. Disponível em: < https://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2021.

PERASAN, Ahmad; SANTHANAGOPALAN, Shriram; KIM, Gi-Heon. **Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications**. 2013. Em: 30th International Battery Seminar, Florida. Disponível em: < <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2021.

PETROVIC, Slobodan. **Battery Technology Crash Course – A Concise Introduction**. Cham, Suíça: Springer, 2021.

PLETT, Gregory L. **Battery Management Systems: Volume 1, Battery Modeling**. Norwood, MA: Artech House, 2015.

POP, Valer; BERGVELD, Henk J.; DANILOV, Dmitry; REGTIEN, Paul P. L.; NOTTEN, Peter H. L. **Battery Management Systems - Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications**. Holanda: Springer, 2008.

REDDY, Thomas B. **Handbook of Batteries, Fourth Edition**. Nova York: McGraw-Hill, 2011.

SAMSUNG SDI CO., LTD. **Specification of product - for Lithium-ion Rechargeable Cell, Model: ICR18650-26F**. 2009. Disponível em: < <https://ultrafire.es/files/ICR18650-26F.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2021.

SARKAR, Sayani; TOTARO, Michael W.; KUMAR, ASHOK. **An Intelligent Framework for Prediction of a UAV's Flight Time**. 2020. Em: 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9183625>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

STRINGARI, Daniel. **Estudo e Desenvolvimento de um BMS para Baterias de Íon-Lítio**. 2020. 68 f. Monografia (TCC) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Joinville. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/218414/Stringari%2C%20Daniel%20-%20BMS.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

SUNDÉN, Bengt. **Hydrogen, Batteries and Fuel Cells**. Cambridge, Estados Unidos: Academic Press, 2019.

TARR, Anthony A.; THOMPSON, Maurice; ELLIS, Jeffrey. **Drone Law and Policy – Global Development, Risks, Regulation and Insurance**. Londres/Nova York: Routledge, 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **INA226 High-Side or Low-Side Measurement, Bi-Directional Current and Power Monitor with I²C Compatible Interface**. 2015. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf?ts=1634402317255>>. Acesso em: 16 out. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors**. 2017. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **Simplifying Current Sensing - How to design with current sense amplifiers**. 2020. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/eb/slyy154a/slyy154a.pdf?ts=1633989160488&>>. Acesso em: 16 out. 2021.

U.S. AIR FORCE. **MQ-9 REAPER**. 2015. Disponível em: <<https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104470/mq-9-reaper/>>. Acesso em: 16 set. 2021.

XIONG, Rui. **Battery Management Algorithm for Electric Vehicles**. Singapura: Springer, 2015.

APÊNDICE B – PROTÓTIPO FINALIZADO



APÊNDICE C – ALGORITMO

```

#include<Servo.h>      //Using servo Library
#define SensorPin A0 // Sinal do potenciômetro
#define MotorPin 8 // Saída de sinal para o motor

#define TemperaturaAlvo 25
#define CorrenteAlvo 1950
#define modo "AQUECER" // Usar AQUECER ou ESFRIAR

// Includes da biblioteca do INA226:
#include <Wire.h>
#include <INA226_WE.h>
#define I2C_ADDRESS 0x40

INA226_WE ina226 = INA226_WE(I2C_ADDRESS); // Cria o objeto INA226

// Servo Motor1; // Declaração da carga controlada

// float VelocidadeMotor = 50; // Cria e inicializa a variável de velocidade do motor com 50. Com 51, o motor começa a movimentar.
// int LeituraPotenciometro = 0; // Recebe o resultado da leitura do potenciometro (0 a 1023)

int releBateriaPin = 4; // Define o pino D4 para acionamento do relé de saída da bateria
int relePeltierPin = 5; // Define o pino D5 para acionamento do Peltier
int pushButtonPin = 3; // Define o pino D3 pra receber o pulso do botão ON/OFF
const float LM35_1 = A1; // Define o pino A1 pra receber o retorno do LM35 1
const float LM35_2 = A2; // Define o pino A2 pra receber o retorno do LM35 2

unsigned long tempo_Anterior_INA226 = 0; // Usada para registrar o instante do envio do último pacote de medições para o
computador
unsigned long tempo_Anterior_INTERRUPT = 0; // Usada para registrar o instante do último clique no botão de ON/OFF
unsigned long tempo_Anterior_RELEPELTIER = 0; // Usada para registrar o instante do último desligamento do Peltier. Serve pra
gerar um tempo de cooldown

// Variáveis de registro das medições dos sensores:
float tensaoBus_V = 0.0;
float corrente_mA = 0.0;
float temp1 = 0;
float temp2 = 0;
int amostras = 0; // Soma o número de amostras lidas de cada sensor para chegar no resultado médio enviado ao PC

int inicioTeste = 0;

// Variáveis para funções de proteção da placa:
int ProtecaoSobrecorrente = 0;
int ProtecaoSubtensao = 0;
int ProtecaoSobretemperatura = 0;

// Variáveis do algoritmo de gerenciamento
double percentualCarga;
double percentualCargaInicial;
int percentualCargaPortao; // Percentual de carga por leitura de tensão
double tempoOperacaoRestante;
float medidaTensao01 = 0;
float medidaTensao02 = 0;
float medidaTensao03 = 0;
float medidaTensao04 = 0;
float medidaTensao05 = 0;
float medidaTensao06 = 0;
float medidaTensao07 = 0;
float medidaTensao08 = 0;
float medidaTensao09 = 0;
float medidaTensao10 = 0;
float mediaTensao10s = 0;
float medidaCorrente01 = 0;
float medidaCorrente02 = 0;
float medidaCorrente03 = 0;
float medidaCorrente04 = 0;
float medidaCorrente05 = 0;
float medidaCorrente06 = 0;
float medidaCorrente07 = 0;
float medidaCorrente08 = 0;

```

```

float medidaCorrente09 = 0;
float medidaCorrente10 = 0;
float mediaCorrente10s = 0;
float consumoComFCs01 = 0;
float consumoComFCs02 = 0;
float consumoComFCs03 = 0;
float consumoComFCs04 = 0;
float consumoComFCs05 = 0;
float consumoComFCs06 = 0;
float consumoComFCs07 = 0;
float consumoComFCs08 = 0;
float consumoComFCs09 = 0;
float consumoComFCs10 = 0;
float consumoComFC01a10 = 0;
float consumoComFC11a20 = 0;
float consumoComFC21a30 = 0;
float consumoComFC31a40 = 0;
float consumoComFC41a50 = 0;
float consumoComFC51a60 = 0;
double consumoAcumuladoMedido = 0;
double consumoAcumuladoComFC = 0;
double consumoAcumuladoComFCeFCE = 0;
int analiseInicial = 0; // Fica em 0 até o algoritmo analisar o % de carga inicial da bateria
double FCE_Geral = 1; // Inicializa com valor 1. Nesse código, ficará sempre em 1
int numeroAmostrasFC = 0; // Só é usado para contar 15 amostras de tensão antes de estimar o % de carga inicial
float FCT_1s = 0; // Fator de correção por temperatura da medição atual
float FCT_Tensao = 0; // Fator de correção por temperatura para medições de tensão
float FCD_1s = 0; // Fator de correção por taxa de descarga da medição atual
int proximoPortao = 0;
double capacidadeTotalTeorica = 0; // Capacidade aplicando FCD e FCT, considerando FCE = 1
int trocaPortao = 0; // Contador de medições para indicar a passagem pelo portão. Exige 5 medições para evitar passagens falsas
int conta10s = 0; // Usado para as variáveis de consumo de carga dos últimos 60 segundos

void setup() {

    pinMode(releBateriaPin, OUTPUT); // Define o pino de acionamento do relé da bateria como saída
    pinMode(relePeltierPin, OUTPUT); // Define o pino de acionamento do Peltier como saída
    pinMode(pushButtonPin, INPUT_PULLUP); // Define o pino de recebimento do pulso do botão ON/OFF como entrada

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pushButtonPin), on_off, RISING); // Gera interrupção ao pressionar o botão ON/OFF

    //Motor1.attach(MotorPin); // Manter comentada se o motor não está sendo utilizado
    Serial.begin(9600); // Inicializa a porta serial

    // Inicialização para o INA226:
    Wire.begin();
    ina226.init();
    ina226.setAverage(AVERAGE_1); // Define que o sensor não fará médias, enviará todas as amostras coletadas
    ina226.setConversionTime(CONV_TIME_1100); // Tempo de conversão, em microssegundos
    ina226.setMeasureMode(CONTINUOUS); // modo de medição contínuo
    ina226.setResistorRange(0.013043478, 6.280533); // (resistor, range de corrente), sendo o resistor:  $(0,1 * 0,015) / (0,1 + 0,015) = 0,013043478$  e o range de corrente:  $V = RI \quad 0,08192 = 0,013043478 * I \quad I = 6,280533A$ 
    ina226.waitUntilConversionCompleted(); // evita retornos iguais a 0 enquanto a primeira medição não está finalizada

    digitalWrite(releBateriaPin, LOW); // Inicia com o relé de entrada aberto. só irá conectar a bateria ao circuito com o pressionar do botão ON/OFF
    digitalWrite(relePeltierPin, LOW); // Inicia com o relé do Peltier aberto.
}

void loop() {

    //LeituraPotenciometro = analogRead(SensorPin); // Lê o sinal do potenciometro e armazena. Descomentar para controle manual
    //VelocidadeMotor = map (LeituraPotenciometro, 0, 1023, 50, 300); // Ao setar o 0V como 50, o motor aceita o pareamento com o potenciometro zerado. 51 é o ponto que inicia a rotação do motor. Descomentar para controle manual

    //Motor1.write(VelocidadeMotor); // Envia a nova velocidade pro motor

    unsigned long tempo_Atual_INA226 = millis();

    ina226.readAndClearFlags();

    // Leitura de todos os sensores:
    temp1 = temp1 + (analogRead(A1) * 0.0048828125 * 100);
    temp2 = temp2 + (analogRead(A2) * 0.0048828125 * 100);
    tensaoBus_V = tensaoBus_V + ina226.getBusVoltage_V();

```

```

corrente_mA = corrente_mA + ina226.getCurrent_mA();
amostras = amostras + 1; // Registra que mais uma amostra foi lida

if (tempo_Atual_INA226 - tempo_Anterior_INA226 >= 1000) { // Faz o processamento das medições e as envia ao PC a cada 1
segundo

    tensaoBus_V = tensaoBus_V / amostras; // Divisão dos valores pelo número de amostras para encontrar a média:
    corrente_mA = corrente_mA / amostras; // Divisão dos valores pelo número de amostras para encontrar a média:
    temp1 = temp1 / amostras; // Divisão dos valores pelo número de amostras para encontrar a média:
    temp2 = temp2 / amostras; // Divisão dos valores pelo número de amostras para encontrar a média:

    temp1 = temp1 - ( ( 0.1875 * temp1 ) - 0.2479 ); // Aplicação da equação de calibração
    temp2 = temp2 - ( ( 0.1287 * temp2 ) - 0.1532 ); // Aplicação da equação de calibração
    corrente_mA = corrente_mA - ( ( 0.0586 * corrente_mA ) - 1.7818 ); // Aplicação da equação de calibração

    if ( digitalRead(relePeltierPin) == 1 ) { // Aplicação da correção pelo acionamento do relé do Peltier, somente quando ele está ativo.
        temp1 = temp1 / 1.112848;
        temp2 = temp2 / 1.110982;
    }

    if ( digitalRead(releBateriaPin) == 1 ) { // Aplicação da correção pelo acionamento do relé da bateria, somente quando ela está
ativa.
        temp1 = temp1 / 1.071309;
        temp2 = temp2 / 1.075876;
    }

    algoritmoGerenciamento(); // Roda a função do algoritmo de gerenciamento

    // Envio dos dados ao PC:

    Serial.print(corrente_mA);
    Serial.print(",");
    Serial.print(tensaoBus_V);
    Serial.print(",");
    Serial.print(percentualCarga);
    Serial.print(",");
    Serial.print(tempoOperacaoRestante);
    Serial.print(",");
    Serial.print(temp1);
    Serial.print(",");
    Serial.print(temp2);
    Serial.println(",");

    // Proteções do sistema:
    if (corrente_mA >= 5200) { // Desconecta a bateria em caso de medição de correntes maiores que 5200mA por 3 segundos
        ProtecaoSobrecorrente = ProtecaoSobrecorrente + 1;
        if ( ProtecaoSobrecorrente >= 3 ) {
            digitalWrite(releBateriaPin, LOW);
        }
    }
    else {
        ProtecaoSobrecorrente = 0;
    }

    if (tensaoBus_V <= 3.00 && tensaoBus_V > 1) { // Desconecta a bateria em caso de medição de tensões menores que 3,00V por 3
segundos. Tem que ser maior que 1V pra evitar que fique desativando enquanto o relé da bateria está desconectado
        ProtecaoSubtensao = ProtecaoSubtensao + 1;
        if ( ProtecaoSubtensao >= 3 ) {
            digitalWrite(releBateriaPin, LOW);
        }
    }
    else {
        ProtecaoSubtensao = 0;
    }

    if ( temp1 > 40 || temp2 > 40 ) { // Desconecta a bateria em caso de medição de temperaturas maiores que 40°C por 3 segundos
        ProtecaoSobretemperatura = ProtecaoSobretemperatura + 1;
        if ( ProtecaoSobretemperatura >= 3 ) {
            digitalWrite(releBateriaPin, LOW);
        }
    }
    else {
        ProtecaoSobretemperatura = 0;
    }

```

```

}

// Controle automático de velocidade do motor. Comentar para controle manual

/*
if (millis() - tempo_Anterior_INTERRUPT >= 60000){

    if (tensaoBus_V >= 1){ // se bateria está desconectada, não há tensão e o programa para de tentar controlar a carga
        if ( ( CorrenteAlvo - corrente_mA ) >= 150) {
            VelocidadeMotor = VelocidadeMotor + 0.5;
        }
        if ( ( corrente_mA - CorrenteAlvo ) >= 150) {
            VelocidadeMotor = VelocidadeMotor - 0.5;
        }
    }
    else { // Evita que o programa tente acelerar o motor com a bateria desconectada
        VelocidadeMotor = 50;
    }
}
*/

// Controle automático de início do ensaio.

/*
if ( modo == "ESFRIAR" && ( temp2 <= TemperaturaAlvo ) && inicioTeste == 0 ) { // Libera o início do teste ao atingir a
temperatura objetivo. Só entra nesse laço uma unica vez
    inicioTeste = 1;
    digitalWrite(releBateriaPin, HIGH);
}

if ( modo == "AQUECER" && ( temp2 >= TemperaturaAlvo ) && inicioTeste == 0 ) { // Libera o início do teste ao atingir a
temperatura objetivo. Só entra nesse laço uma unica vez
    inicioTeste = 1;
    digitalWrite(releBateriaPin, HIGH);
}

// Controle automático de temperatura. Comentar para controle manual
if ( modo == "AQUECER" && tempo_Atual_INA226 - tempo_Anterior_RELEPELTIER >= 10000 ) {
    if ( (TemperaturaAlvo - temp2) >= 0){
        digitalWrite(relePeltierPin, HIGH);
        tempo_Anterior_RELEPELTIER = tempo_Atual_INA226;
    }
    else{
        digitalWrite(relePeltierPin, LOW);
        tempo_Anterior_RELEPELTIER = tempo_Atual_INA226;
    }
}

if ( modo == "ESFRIAR" && tempo_Atual_INA226 - tempo_Anterior_RELEPELTIER >= 10000 ) {
    if ( (temp2 - TemperaturaAlvo) >= 0){
        digitalWrite(relePeltierPin, HIGH);
    }
    else{
        digitalWrite(relePeltierPin, LOW);
        tempo_Anterior_RELEPELTIER = tempo_Atual_INA226;
    }
}
*/

// Zera as variáveis para iniciar um novo ciclo de medições:
tensaoBus_V = 0;
corrente_mA = 0;
amostras = 0;
temp1 = 0;
temp2 = 0;

tempo_Anterior_INA226 = tempo_Atual_INA226; // Registra o momento do último envio de dados para o PC
}
}

void on_off() { // Entra aqui ao pressionar o botão on/off

    unsigned long tempo_Atual_INTERRUPT = millis();

```

```

if (tempo_Atual_INTERRUPT - tempo_Anterior_INTERRUPT >= 1000) {

    int estado;
    estado = digitalRead(releBateriaPin);

    if (estado == 1) {
        digitalWrite(releBateriaPin, LOW);
        //Serial.println("desligou rele bateria 4");
    }
    else {
        digitalWrite(releBateriaPin, HIGH);
        //Serial.println("ligou rele bateria 2");
    }
    tempo_Anterior_INTERRUPT = tempo_Atual_INTERRUPT;
}
}

void algoritmoGerenciamento() {

    if ( tensaoBus_V >= 1 ) { // Só faz o gerenciamento se a bateria está conectada

        // médias de tensão e corrente para cálculo de passagem nos portões:
        medidaTensao10 = medidaTensao09;
        medidaTensao09 = medidaTensao08;
        medidaTensao08 = medidaTensao07;
        medidaTensao07 = medidaTensao06;
        medidaTensao06 = medidaTensao05;
        medidaTensao05 = medidaTensao04;
        medidaTensao04 = medidaTensao03;
        medidaTensao03 = medidaTensao02;
        medidaTensao02 = medidaTensao01;
        medidaTensao01 = tensaoBus_V;
        medidaCorrente10 = medidaCorrente09;
        medidaCorrente09 = medidaCorrente08;
        medidaCorrente08 = medidaCorrente07;
        medidaCorrente07 = medidaCorrente06;
        medidaCorrente06 = medidaCorrente05;
        medidaCorrente05 = medidaCorrente04;
        medidaCorrente04 = medidaCorrente03;
        medidaCorrente03 = medidaCorrente02;
        medidaCorrente02 = medidaCorrente01;
        medidaCorrente01 = corrente_mA;
        mediaTensao10s = ( medidaTensao01 + medidaTensao02 + medidaTensao03 + medidaTensao04 + medidaTensao05 +
        medidaTensao06 + medidaTensao07 + medidaTensao08 + medidaTensao09 + medidaTensao10 ) / 10;
        mediaCorrente10s = ( medidaCorrente01 + medidaCorrente02 + medidaCorrente03 + medidaCorrente04 + medidaCorrente05 +
        medidaCorrente06 + medidaCorrente07 + medidaCorrente08 + medidaCorrente09 + medidaCorrente10 ) / 10;

        numeroAmostrasFC++;

        FCT_1s = -0.0000204180 * pow(temp2, 3) + 0.0009662330 * pow(temp2, 2) - 0.0110050299 * temp2 + 0.9894299551; // Fórmula
        para determinar FCT
        FCT_Tensao = -0.0000027041 * pow(temp2, 4) + 0.0001889973 * pow(temp2, 3) - 0.0047495975 * pow(temp2, 2) + 0.0511893117 *
        temp2 + 0.7919661165;

        // Fórmula para FCD. Foi fracionada para reduzir a complexidade
        if ( corrente_mA <= 1300 ) {
            FCD_1s = -0.43151479 * (corrente_mA / 2600) + 1.10789529;
        }
        else if ( corrente_mA <= 1950 ) {
            FCD_1s = -1.47009440 * (corrente_mA / 2600) + 1.62743676;
        }
        else {
            FCD_1s = -0.34356459 * (corrente_mA / 2600) + 0.78396056;
        }

        if ( FCD_1s >= 1 ) { // Evita valores maiores que 1. Pode acontecer se a corrente for muito baixa, já que FCD é 1 a 650mA
            FCD_1s = 1;
        }

        if ( ( analiseInicial == 0 ) && ( numeroAmostrasFC > 15 ) ) { // Entra aqui uma única vez para leitura inicial da bateria. espera o
        relatório de 15 medições após conexão da bateria antes de entrar aqui

            if ( mediaTensao10s >= 3.71 ) { // Equação fracionada para simplificação

```

```

    percentualCarga = ( 102.313522 * mediaTensao10s ) - 329.820503;
  }
  else {
    percentualCarga = 270.050776 * pow(mediaTensao10s, 2) - 1768.690247 * mediaTensao10s + 2895.217130;
  }

  percentualCargaInicial = percentualCarga;

  if ( percentualCarga <= 10 ) { // Não aceitar o uso da bateria com percentual menor que 10%
    percentualCarga = 0;
  }
  if ( percentualCarga > 100 ) {
    percentualCarga = 100;
  }

  if ( percentualCarga >= 90 ) {
    proximoPortao = 90;
  }
  else if ( percentualCarga >= 80 ) {
    proximoPortao = 80;
  }
  else if ( percentualCarga >= 70 ) {
    proximoPortao = 70;
  }
  else if ( percentualCarga >= 60 ) {
    proximoPortao = 60;
  }
  else if ( percentualCarga >= 50 ) {
    proximoPortao = 50;
  }
  else if ( percentualCarga >= 40 ) {
    proximoPortao = 40;
  }
  else if ( percentualCarga >= 30 ) {
    proximoPortao = 30;
  }
  else if ( percentualCarga >= 20 ) {
    proximoPortao = 20;
  }
  else if ( percentualCarga >= 10 ) {
    proximoPortao = 10;
  }
  analiseInicial = 1;
}

else if ( ( analiseInicial == 1 ) && ( medidaTensao10 > 0 ) ) { // Entra aqui todas as vezes após a leitura inicial da bateria

  if ( mediaCorrente10s >= 650 ) { // Evita que o algoritmo derrube o %de carga erroneamente quando a corrente de carga é muito baixa. Isso porque as equações são próprias para uso idealmente entre 650 e 2600mA. Aqui é feita a análise por tensão

    if ( proximoPortao == 90 ) {
      if ( tensaoBus_V <= ( ( 0.76 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 1.698 * ( corrente_mA / 2600 ) + 4.2725 ) * FCT_Tensao ) ) {
        trocaPortao++;
        if ( trocaPortao >= 5 ) {
          proximoPortao = 80;
          percentualCargaPortao = 90;
        }
      }
    }
    else if ( proximoPortao == 80 ) {
      if ( tensaoBus_V <= ( ( 0.76 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 1.594 * ( corrente_mA / 2600 ) + 4.1525 ) * FCT_Tensao ) ) {
        trocaPortao++;
        if ( trocaPortao >= 5 ) {
          proximoPortao = 70;
          percentualCargaPortao = 80;
        }
      }
    }
  }

  if ( proximoPortao == 70 ) {
    if ( tensaoBus_V <= ( ( 0.68 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 1.382 * ( corrente_mA / 2600 ) + 3.9975 ) * FCT_Tensao ) ) {
      trocaPortao++;
      if ( trocaPortao >= 5 ) {
        proximoPortao = 60;
      }
    }
  }
}

```

```

    percentualCargaPortao = 70;
  }
}
else if ( proximoPortao == 60 ) {
  if ( tensaoBus_V <= ( ( 0.72 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 1.364 * ( corrente_mA / 2600 ) + 3.89 ) * FCT_Tensao ) ) {
    trocaPortao++;
    if ( trocaPortao >= 5 ) {
      proximoPortao = 50;
      percentualCargaPortao = 60;
    }
  }
}
else if ( proximoPortao == 50 ) {
  if ( tensaoBus_V <= ( ( -0.64 * pow((corrente_mA / 2600), 3) + 1.92 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 1.92 * ( corrente_mA /
2600 ) + 3.86 ) * FCT_Tensao ) ) {
    trocaPortao++;
    if ( trocaPortao >= 5 ) {
      proximoPortao = 40;
      percentualCargaPortao = 50;
    }
  }
}
else if ( proximoPortao == 40 ) {
  if ( tensaoBus_V <= ( ( -1.28 * pow((corrente_mA / 2600), 3) + 3.12 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 2.58 * ( corrente_mA /
2600 ) + 3.91 ) * FCT_Tensao ) ) {
    trocaPortao++;
    if ( trocaPortao >= 5 ) {
      proximoPortao = 30;
      percentualCargaPortao = 40;
    }
  }
}
else if ( proximoPortao == 30 ) {
  if ( tensaoBus_V <= ( ( -1.17333333 * pow((corrente_mA / 2600), 3) + 2.96 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 2.50666666 * (
corrente_mA / 2600 ) + 3.85 ) * FCT_Tensao ) ) {
    trocaPortao++;
    if ( trocaPortao >= 5 ) {
      proximoPortao = 20;
      percentualCargaPortao = 30;
    }
  }
}
else if ( proximoPortao == 20 ) {
  if ( tensaoBus_V <= ( ( -1.06666667 * pow((corrente_mA / 2600), 3) + 2.8 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 2.43333333 * (
corrente_mA / 2600 ) + 3.79 ) * FCT_Tensao ) ) {
    trocaPortao++;
    if ( trocaPortao >= 5 ) {
      proximoPortao = 10;
      percentualCargaPortao = 20;
    }
  }
}
else if ( proximoPortao == 10 ) {
  if ( tensaoBus_V <= ( ( -0.85333333 * pow((corrente_mA / 2600), 3) + 2.24 * pow((corrente_mA / 2600), 2) - 1.94666667 * (
corrente_mA / 2600 ) + 3.61 ) * FCT_Tensao ) ) {
    trocaPortao++;
    if ( trocaPortao >= 5 ) {
      proximoPortao = 0;
      percentualCargaPortao = 10;
    }
  }
}
}

////////////////////////////////////

// Obtenção do consumo médio no último minuto. Usado para estimar o tempo de operação restante
consumoComFCs10 = consumoComFCs09;
consumoComFCs09 = consumoComFCs08;
consumoComFCs08 = consumoComFCs07;
consumoComFCs07 = consumoComFCs06;
consumoComFCs06 = consumoComFCs05;
consumoComFCs05 = consumoComFCs04;

```

```

consumoComFCs04 = consumoComFCs03;
consumoComFCs03 = consumoComFCs02;
consumoComFCs02 = consumoComFCs01;
consumoComFCs01 = ((corrente_mA / 3600) / (FCT_1s * FCD_1s * FCE_Geral)); // Em mAh

conta10s++;

if ( conta10s >= 10 ) {

    consumoComFC51a60 = consumoComFC41a50;
    consumoComFC41a50 = consumoComFC31a40;
    consumoComFC31a40 = consumoComFC21a30;
    consumoComFC21a30 = consumoComFC11a20;
    consumoComFC11a20 = consumoComFC01a10;
    consumoComFC01a10 = ( consumoComFCs01 + consumoComFCs02 + consumoComFCs03 + consumoComFCs04 +
consumoComFCs05 + consumoComFCs06 + consumoComFCs07 + consumoComFCs08 + consumoComFCs09 + consumoComFCs10
);

    conta10s = 0;
}

consumoAcumuladoMedido = consumoAcumuladoMedido + (corrente_mA / 3600); // Consumo acumulado real medido, sem
nenhum fator de correção
consumoAcumuladoComFC = consumoAcumuladoComFC + ((corrente_mA / 3600) / (FCT_1s * FCD_1s )); // Consumo
acumulado medido com adição de FCT e FCD
consumoAcumuladoComFCeFCE = consumoAcumuladoComFCeFCE + ((corrente_mA / 3600) / (FCT_1s * FCD_1s *
FCE_Geral)); // Nesse caso é igual a consumoAcumuladoComFC, pois FCE_Geral é sempre 1

capacidadeTotalTeorica = 2434.27 * ( consumoAcumuladoMedido / consumoAcumuladoComFC ); // Estimativa que leva em
conta FCT e FCD, mas NÃO FCE

if ( ( trocaPortao >= 5 ) && ( ( percentualCargaInicial - percentualCargaPortao ) >= 10 ) ) { // Exige ao menos 10% de descarga
para ter uma referência relativamente confiável.
    //FCE_Geral = consumoAcumuladoComFC / ( ( ( percentualCargaInicial - percentualCargaPortao ) / 100 ) * 2434.27 ); // Acha
o FCE comparando as medições de mAh descarregadas (com fatores) em relação à capacidade que deveria ter sido obtida ao passar
pelo portão. Não está sendo usado, pois as medições de tensão não são confiáveis
    trocaPortao = 0;
}

if ( trocaPortao >= 5 ) {
    trocaPortao = 0;
}

percentualCarga = percentualCargaInicial - ( ( consumoAcumuladoComFCeFCE / 2434.27 ) * 100 ); // Aqui calcula o percentual
de carga atual

if ( percentualCarga <= 0 ) { // Não permite estimativas negativas. Sem esse critério, se o algoritmo chegar a 0% antes da bateria
estar totalmente descarregada, ele passa a retornar valores negativos.
    percentualCarga = 0;
}

tempoOperacaoRestante = ( ( percentualCarga / 100 ) * 2434.27 ) / ( ( ( consumoComFC01a10 + consumoComFC11a20 +
consumoComFC21a30 + consumoComFC31a40 + consumoComFC41a50 + consumoComFC51a60 ) / 60 ) / ( FCT_1s * FCD_1s *
FCE_Geral ) ); // Em segundos

if ( tempoOperacaoRestante <= 0 ) { // Não permite estimativas negativas. Sem esse critério, se o algoritmo chegar a 0% antes da
bateria estar totalmente descarregada, ele passa a retornar valores negativos.
    tempoOperacaoRestante = 0;
}
}
else {
    percentualCarga = 0;
    tempoOperacaoRestante = 0;
}
}
}

```