Patrick Cadier D'Aquino e Baroni Santos

MÉTODOS PARA A ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE BATERIAS
ESTACIONÁRIAS COM ÊNFASE EM APLICAÇÕES DE SEGURANÇA

São Paulo
2020 – (Edição Original)
2021 – (Versão Corrigida)

Patrick Cadier D'Aquino e Baroni Santos

MÉTODOS PARA A ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE BATERIAS ESTACIONÁRIAS COM ÊNFASE EM APLICAÇÕES DE SEGURANÇA

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica – Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Seabra
Co-Orientador: Prof. Dr. Emilio Del Moral
Hernandez

São Paulo
2020 – (Edição Original)
2021 – (Versão Corrigida)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 6 de Janeiro de 2021

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Santos, Patrick

MÉTODOS PARA A ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE BATERIAS
ESTACIONÁRIAS COM ÊNFASE EM APLICAÇÕES DE SEGURANÇA / P. Santos
-- versão corr. -- São Paulo, 2021.
138 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.BATERIAS ELÉTRICAS 2.REDES NEURAIIS 3.FUZZY (INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antônio Carlos Seabra, meu orientador, pela ajuda e paciência durante o mestrado.

Ao professor Emilio Del Moral Hernandez, meu co-orientador, pelas ideias e propostas que ajudaram esse trabalho.

Aos participantes do grupo ICONE pelas dicas.

À Cássia, minha esposa que me ajudou a persistir estudando.

Aos meus pais, Irene e Cassio, que me incentivaram sempre a estudar.

À Laura, minha filha que mesmo tão nova já me dá forças para continuar.

RESUMO

Neste projeto, é proposto métodos diferentes para medir a capacidade e o envelhecimento de baterias estacionárias com ênfase em aplicações de segurança. Para tanto, é primeiro descrito a importância de baterias em diversas aplicações, principalmente as baterias de íons de lítio. Um estudo das características elétricas e químicas de baterias de íons de lítio é apresentado, mostrando entre outras coisas as causas eletroquímicas do envelhecimento.

Além disso, as diferentes técnicas para o monitoramento de sistemas são mostradas. Neste projeto pretende-se usar redes neurais, lógica fuzzy e adaptatividade para estimar a capacidade de uma bateria usando os valores da resistência e capacitância interna. Os dados recolhidos são apresentados e analisados. Os diferentes métodos são comparados e as vantagens e desvantagens de cada método são discutidas.

Palavras-chave: Baterias elétricas. Redes Neurais. Lógica Fuzzy.

ABSTRACT

This project proposes different methods for measuring the capacity and aging of stationary batteries on security systems. For this, it is first described batteries' important role on many applications, especially concerning lithium-ion batteries. A study of electrical and chemical characteristics of lithium-ion batteries is presented, showing among other things the electrochemical causes for aging.

Furthermore, different techniques for Battery Management System (BMS) are shown. In this project we intend to use a neural network, fuzzy logic and adaptability to estimate the battery's capacity using the internal resistance and capacitance values. The data collected is presented and analyzed. In the end, each method is compared with one another.

Keywords: Electrical batteries. Neural networks. Fuzzy logic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento do mercado de baterias de íons de lítio.	17
Figura 2 - Crescimento do mercado de baterias de lítio.	18
Figura 3 - Mercado de baterias.	18
Figura 4 - Comparação da densidade energética entre tecnologias.	20
Figura 5 - Comparação da densidade energética entre tecnologias.	20
Figura 6 - Comparação do número de ciclos entre tecnologias.	21
Figura 7 - Evolução do preço em U\$/Wh de diferentes formatos.	21
Figura 8 - Número de artigos sobre baterias de íons de lítio por país.	22
Figura 9 - Formatos de bateria: a - cilíndrico. b - prismático. c - laminado ou pouch.	25
Figura 10 - Estrutura do catodo de Lítio-Cobalto.	26
Figura 11 - Estrutura do catodo de Lítio-Manganês.	26
Figura 12 - Capacidade em função da descarga.	27
Figura 13 - Capacidade em função do número de ciclos.	29
Figura 14 - Evolução do SOH em função da carga e da temperatura.	30
Figura 15 - Evolução do SOH em função da carga.	30
Figura 16 - Relação entre o SOC, o SOH e o SOF.	32
Figura 17 - Previsão da evolução do SOH.	34
Figura 18 - Evolução do SOH em função da tensão máxima de carga.	35
Figura 19 - Evolução da Capacidade em função da temperatura e SOC.	36
Figura 20 - Evolução da Capacidade em função da corrente de descarga.	38
Figura 21 - Modelo de Randle de uma bateria.	38
Figura 22 - Circuito de proteção em bateria de íons de lítio.	39
Figura 23 - Circuito de proteção da bateria de íons de lítio.	40
Figura 24 - Circuito modelo do teste para estimar os parâmetros da bateria.	42
Figura 25 - Tensão na saída da bateria durante o teste.	42
Figura 26 - Circuito equivalente para o cálculo da resistência de Thévenin.	43
Figura 27 - Circuito equivalente de Thévenin.	44
Figura 28 - Comparação entre a simulação e os valores medidos.	46
Figura 29 - Circuito de carga das baterias.	47
Figura 30 - Circuito de descarga das baterias.	47
Figura 31 - Foto dos 3 tipos de baterias testadas.	48
Figura 32 - Curvas de carga e descarga da bateria 2.	52
Figura 33 - Curvas do início da descarga da bateria 2.	53

Figura 34 - Relação entre a capacitância e o SOH.	54
Figura 35 - Relação entre a resistência Rx e o SOH.....	54
Figura 36 - Relação entre a resistência Rx e o SOH dividido por modelo de bateria.	55
Figura 37 - Relação entre a capacitância e o SOH dividido por modelo de bateria. .	55
Figura 38 - Evolução do SOH, da resistência Rx e da capacitância ciclo a ciclo da bateria 1.	57
Figura 39 - Evolução do SOH, da resistência Rx e da capacitância ciclo a ciclo da bateria 3.	58
Figura 40 - Modelo de um <i>perceptron</i> de uma rede neural.	61
Figura 41 - Ilustração do método de gradiente decrescente.	62
Figura 42 - Rede neural com uma camada interna.	63
Figura 43 - formas de funções de pertencimento: a) trapezoidal, b) triangular, c) formato de sino e d) guassiana,	64
Figura 44 - Componentes de um sistema de lógica fuzzy,	65
Figura 45 - Funções de pertencimento triangulares para a análise da resistência....	66
Figura 46 - Funções de pertencimento triangulares para a análise da capacitância.	66
Figura 47 - Funções de pertencimento gaussianas para a análise da resistência. ...	67
Figura 48 - Funções de pertencimento gaussianas para a análise da capacitância.	67
Figura 49 - Topologia da rede neural.	75
Figura 50 - Gráfico do erro médio da rede neural por faixa de valor de SOH.	76
Figura 51 - Gráfico do erro médio no modelo de Sugeno de ordem 0 por faixa de valor de SOH.	78
Figura 52 - Gráfico do erro médio no modelo de Sugeno de ordem 1 por faixa de valor de SOH.	80
Figura 53 - Diminuição do erro médio da bateria 3 para cada dado novo.....	83
Figura 54 - Diminuição do erro médio da bateria 5 para cada dado novo.....	83
Figura 55 - Diminuição do erro médio da bateria 11 para cada dado novo.....	84
Figura 56 - Diminuição do erro médio da bateria 17 para cada dado novo.....	84
Figura 57 - Diminuição do erro médio da bateria 3 na segunda versão do algoritmo.	86
Figura 58 - Diminuição do erro médio da bateria 5 na primeira versão do algoritmo.	87

Figura 59 - Diminuição do erro médio da bateria 5 na segunda versão do algoritmo.	87
Figura 60 - Comparação da diminuição do erro médio para o 2º e 3º algoritmo com a bateria 10.	89
Figura 61 - Topologia da segunda rede neural para previsão do EOL.	90
Figura 62 - Topologia da terceira rede neural.	91
Figura 63 - Gráfico do erro médio no 1º modelo linear por faixa de valor.	93
Figura 64 - Gráfico do erro médio no 2º modelo linear por faixa de valor.	95
Figura 65 - Gráfico do erro médio no 3º modelo linear por faixa de valor.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Registro das tensões da bateria nos primeiros 400ms de teste exemplo	45
Tabela 2 - Valores estimados do modelo de Randle de um teste exemplo.....	45
Tabela 3 - Definição do fator de ciclo da descarga.	50
Tabela 4 - Resultados da rede neural.	76
Tabela 5 - Resultados da rede neural.	77
Tabela 6 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 0.	78
Tabela 7 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 0.	79
Tabela 8 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 1.	80
Tabela 9 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 0.	81
Tabela 10 - Erros médios da rede inicial e da rede adaptativa.....	82
Tabela 11 - Erros médios da rede inicial e da segunda versão da rede adaptativa. .	86
Tabela 12 - Erros médios da rede inicial e da rede adaptativa final.	88
Tabela 13 - Resultados da segunda rede neural.....	91
Tabela 14 - Comparando os resultados da primeira e terceira redes neurais.	92
Tabela 15 - Resultados do 1º modelo linear.....	93
Tabela 16 - Resultados do 1º modelo linear.....	94
Tabela 17 - Resultados do 2º modelo linear.....	94
Tabela 18 - Resultados do 2º modelo linear.....	95
Tabela 19 - Resultados do 3º modelo linear.....	96
Tabela 20 - Resultados do 3º modelo linear.....	97
Tabela 21 - Comparação dos resultados.	98
Tabela 22 - Pesos da rede neural 9x5.	122
Tabela 23 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 0.....	124
Tabela 24 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 1, regras para R_i	125
Tabela 25 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 1, regras para C_i	126
Tabela 26 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 1, regras para b_i	127
Tabela 27 - Pesos da segunda rede neural.....	128
Tabela 28 - Pesos da terceira rede neural.	131
Tabela 29 – Relação dos modelos de baterias utilizados.	133
Tabela 30 – Dados obtidos.....	134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC/DC	Alternating Current / Direct Current
ADC	Analog to Digital Converter
AHC	Capacidade nominal em Ah
ARM	Advanced RISC Machine
BMS	Battery Management System
CID	Circuit Interrupt Device
CDL	Capacitância de Dupla Camada
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
EOL	End Of Life
EV	Electric Vehicle
FW	Firmware
HEV	Hybrid Electric Vehicle
MBP	Multiple Back-Propagation
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
PC	Personal Computer
PDF	Probability Density Function
PF	Particle Filtering
PHM	Prognostics and Health Management
PN	Part Number
PoF	Physics Of Failure
PTC	Positive Thermal Coefficient

PWM	Pulse Width Modulation
RCT	Resistência de Transferência de Carga
RE	Resistência do Eletrólito.
RUL	Remaining Useful Life
RVM	Relevance Vector Machine
RW	Resistência de Warburg
SCA	Self-Clustering Algorithm
SOC	State Of Charge ou estado da carga
SOF	State of Function ou estado de funcionalidade
SOH	State Of Health ou estado de saúde
SOL	State of Life
SW	Software
TI	Tecnologia da Informação
USB	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	11
SUMÁRIO.....	13
1. Introdução	17
1.1. Objetivo	17
1.2. Relevância das baterias estacionárias	17
1.3. Justificativas do projeto	22
2. Modelos e parâmetros das baterias de íons de lítio	25
2.1. Descrição de uma bateria de lítio (“rocking chair”)	25
2.2. Descrição dos parâmetros de medição da bateria	27
➤ SOC: State Of Charge	28
➤ SOH: State Of Health	29
➤ Outros parâmetros	32
2.3. Justificativas para o envelhecimento das baterias	35
➤ Sobrecarga	35
➤ Coletores de corrente	35
➤ Auto descarga	36
➤ Redução do eletrólito	37
➤ Período de formação e passivação	37
➤ Dissolução do material ativo	37
➤ Troca de fase	37
2.4. Modelo da bateria	38

2.5. Exemplo de circuito de proteção	39
3. Método experimental.....	41
3.1. Escolha do modelo.....	41
3.2. Cálculos de resistência e capacitância usando o ADC do microcontrolador.....	41
3.3. Descrição do Hardware.....	46
3.4. Descrição do firmware.....	49
➤ Função de log	49
➤ Função de carga	49
➤ Função de descarga	50
3.5. Tratamento dos dados experimentais	51
4. Análise dos dados obtidos	52
4.1. Análise inicial dos dados.....	52
4.2. Problemas e imperfeições na medição	56
5. Base teórica dos métodos.....	60
5.1. Redes neurais	60
5.2. Lógica fuzzy	64
5.2.1. Base teórica da lógica fuzzy	64
5.2.2. Método de Sugeno de ordem 0 e 1	65
5.2.3. Exemplos de análise de baterias usando lógica fuzzy.....	68
5.3. Adaptatividade	69
5.3.1. Adaptatividade na literatura	69
5.3.2. Inserção de adaptatividade.....	71
5.4. Melhorando a previsão de EOL com redes neurais	73
5.5. Comparação dos métodos	74
5.6. Validação cruzada.....	74
6. Resultados	75
6.1. Redes neurais.....	75

6.2. Lógica Fuzzy	77
6.2.1. Resultados para o modelo de Sugeno de ordem 0.....	77
6.2.2. Resultados para o modelo de Sugeno de ordem 1.....	79
6.3. Método adaptativo.....	81
6.3.1. Primeira versão do algoritmo adaptativo	81
6.3.2. Resultados da versão final do algoritmo adaptativo	85
6.4. Melhoramento das previsões da rede neurais	89
6.5. Método linear	92
6.5.1. Resultados considerando somente a resistência.....	92
6.5.2. Resultados considerando somente a capacitância.....	94
6.5.3. Resultados considerando a resistência e a capacitância	95
7. Análise dos resultados	98
8. Conclusão	101
REFERÊNCIAS.....	102
APÊNDICES.....	108
APÊNDICE A - Funções do FW de aquisição de dados.....	108
➤ Função de carga	108
➤ Função de descarga nos primeiros 400ms	109
➤ Função de descarga	110
APÊNDICE B - Extratos do SW criado para análise com rede neural	111
APÊNDICE C - Extratos do SW criado para análise com lógica fuzzy	113
➤ Função de pertinência triangular.....	113
➤ Função de pertinência gaussiana	113
➤ Cálculo das funções de pertinência	114
➤ Cálculo do SOH estimado para o Sugeno de ordem 0	114
APÊNDICE D - Extratos do SW criado para análise com algoritmo adaptativo...	117
APÊNDICE E - Extratos do SW criado para análise usando método linear.....	120

APÊNDICE F – Pesos da rede neural 9x5.....	122
APÊNDICE G – Tabela de regras obtidas para o modelo de Sugeno de ordem 0	124
APÊNDICE H – Tabela de regras obtidas para o modelo de Sugeno de ordem 1	125
APÊNDICE I – Pesos obtidos para a segunda rede neural do método de melhoramento de EOL.....	128
APÊNDICE J – Pesos obtidos para a terceira rede neural do método de melhoramento de EOL.....	131
APÊNDICE K – Relação dos modelos de baterias utilizados.	133
APÊNDICE L –Relação dos dados obtidos.	134
ANEXOS	145
ANEXO A - Extratos do datasheet da bateria Expower (PN: 483757) de 1000mAH	145
ANEXO B - Extratos do datasheet da bateria Expower (PN: 483759) de 1000mAH	147
ANEXO C - Extratos do datasheet da bateria HCT (PN: HCT053759P) de 1150mAH	148
ANEXO D - Extratos do datasheet do LPC1778.....	150
ANEXO E - Extratos do datasheet do FS312F-P.....	154

1. Introdução

1.1. *Objetivo*

O objetivo principal da pesquisa é analisar métodos com baixa complexidade computacional, que possam ser usados em diversas soluções com microcontroladores embarcados, que estimem a capacidade de baterias estacionárias de íons de lítio, que garantem o funcionamento de aplicações críticas em segurança. Para essa finalidade uma rede neural foi treinada e testada usando os dados recolhidos por um microcontrolador. Uma análise usando lógica fuzzy e adaptatividade também foi feita, podendo assim comparar os resultados entre as diferentes técnicas. Assim o microcontrolador conseguiria prever a capacidade da bateria e estimar a taxa de envelhecimento podendo indicar quando é necessário realizar a manutenção.

1.2. *Relevância das baterias estacionárias*

Baterias de íons de lítio são essenciais para diversos projetos em eletrônica e o seu uso se popularizou na primeira década deste século. Em 2008, a revista The Economist (2008) já indicava que estas baterias representavam 70% do mercado para celulares. Brodd (2001) mostrava que o crescimento das baterias de lítio foi exponencial durante essa década com o uso delas nesse mercado como mostra a figura 1:

Figura 1 - Crescimento do mercado de baterias de íons de lítio.

Fonte: Brodd (2001)

Taiyou Research (2013) previu que o mercado de bateria recarregáveis cresceu de 10 bilhões de dólares em 2010 para cerca de 50 bilhões de dólares em 2020 graças ao crescimento dos veículos elétricos e dos sistemas de armazenamento de energia (usina eólicas por exemplo). A figura 2 mostra o crescimento do valor de mercado das baterias de lítio:

Figura 2 - Crescimento do mercado de baterias de lítio.

Fonte: Taiyou Research (2013).

Além dessa previsão de crescimento, a bateria de íon de lítio é o tipo de bateria mais importante no mercado atualmente como mostra a figura 3:

Figura 3 - Mercado de baterias.

Fonte: Buchmann (2015).

Para Taiyou Research (2013), o setor de eletrônicos de consumo é o que mais usa baterias de íons de lítio. Porém é possível encontrar esse tipo de bateria em diversas outras indústrias como, por exemplo, a indústria automobilística com os HEVs (*Hybrid Electric Vehicles*) e EVs (*Electric Vehicles*). Inclusive Chen et al (2013) argumenta que “as baterias de lítio são a única solução viável” para esse tipo de veículo. Passerini e Scrosati (2016) lembram que sistemas de armazenamento de energia sustentável como usinas de energia solar ou eólica dependem dessas baterias porque a produção da energia é irregular durante o tempo.

Essa é uma das aplicações de baterias estacionárias, que fornecem energia quando a fonte principal não está presente, ou seja, elas funcionam como uma reserva (*buffer*) para a fonte principal. Baterias estacionárias são também importante para sistemas de segurança se protegerem de quedas de energia. Buchmann (2015) cita entre outros exemplos, a bateria do carro que aciona o sistema de ignição, baterias em sistemas de produção de energia por energia solar e baterias de emergência em automação residencial. Este projeto focará em baterias de íon de lítio sendo usadas como baterias estacionárias em sistemas de segurança. Nesse tipo de aplicação ela só é utilizada em situações de emergência e presume-se que a bateria fique sempre carregada, sendo testada apenas em eventuais ciclos de manutenção preventiva.

Yanga et al (2017) explicam que essas baterias são usadas como estacionárias graças a maior densidade energética e o maior ciclo de vida. Para Choi e Aurbach (2016), densidade energética é a principal propriedade de uma bateria recarregável. Segundo Armand e Tarascon (2008), a densidade de uma bateria de íons de lítio é de até 180Wh/kg, ou seja, 5 vezes mais que as de chumbo ácido. Essa comparação é feita também por Buchmann (2015) e Linden e Reddy (2015) nas figuras 4 e 5:

Figura 4 - Comparação da densidade energética entre tecnologias.

Fonte: Linden e Reddy (2015)

Figura 5 - Comparação da densidade energética entre tecnologias.

Fonte: Buchmann (2015).

As baterias de íons de lítio são mais caras que as outras baterias, porém para Buchmann (2015) as baterias de íons de lítio têm um custo por ciclo menor já que possuem baixa necessidade de manutenção e maior número de ciclo durante a sua vida útil. Esse maior número de ciclos é mostrado na figura 6:

Figura 6 - Comparação do número de ciclos entre tecnologias.

Fonte: Linden e Reddy (2015).

Além disso, o custo da bateria de íons de lítio vem caindo ano a ano como mostra a figura 7:

Figura 7 - Evolução do preço em US\$/Wh de diferentes formatos.

Fonte: Buchmann (2015)

Outra vantagem desse tipo de bateria de acordo com Armand e Tarascon (2008), é que “o mesmo íon (Li^+) participa das reações nos dois eletrodos”. Isso permite que a bateria seja mais simples e mais leve.

Esses avanços tecnológicos são importantes também por oferecerem uma solução à combustíveis fósseis. Armand e Tarascon (2008) defendem que para substituir os combustíveis fósseis, “as baterias de íons de lítio deverão diminuir a sua pegada de carbono”. Wu, Zhang e Chen (2016) também indicam que o fato de ser menos poluente é uma das razões da popularidade das baterias de lítio.

Portanto as baterias de íons de lítio fazem parte de um mercado em expansão e possuem qualidades e vantagens que justificam essa expansão. Os avanços nessa área permitem que esse tipo de bateria seja cada vez mais usado e por isso é importante e necessário o estudo dessas baterias para diversas aplicações, principalmente em aplicações de segurança onde as baterias estacionárias normalmente funcionam como garantia da não interrupção do sistema. Além disso, Choi e Aurbach (2016) dizem que a demanda por uma maior densidade energética continua alta e a dependência em baterias recarregáveis nos mercados de TI e transporte está aumentando, o que justificaria a intensa pesquisa no assunto. A figura 8 relata a importância dessa área com a quantidade de artigos sobre baterias de íons de lítio por país:

Figura 8 - Número de artigos sobre baterias de íons de lítio por país.

Fonte: Passerini e Scrosati (2016).

1.3. *Justificativas do projeto*

Além de garantir maior segurança para o usuário sobre o estado das baterias estacionárias, uma análise mais completa da qualidade e estado da bateria é imprescindível para evitar manutenção periódica desnecessária ou trocas. A medição do estado de vida de uma bateria está se tornando crucial já que um maior número de

sistemas depende dessa fonte de energia (SBARUFATTI et al, 2017). Adicionalmente, com informações corretas sobre o estado da bateria, seria possível realizar a manutenção da bateria da maneira mais eficiente e com o menor custo além de gerar maior confiança na aplicação.

Portanto, a característica mais importante do projeto é a automação embarcada do processo de medição e, para tanto, é preciso que a solução tenha baixa complexidade computacional, ou seja, consiga ser executada com um microcontrolador sem que seja necessária mudança no projeto do sistema já embarcado. Assim seria possível utilizar a solução em um maior número de aplicações e com maior facilidade. Como argumentam Wu, Zhang e Chen (2016), as técnicas de gerenciamento de bateria estão precisando cada vez mais de hardware mais complexos. E Buchmann (2015) explica que apesar de muitas pesquisas usarem Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS - *Electrochemical Impedance Spectroscopy*), esse método envolve custo alto de equipamento, alto tempo de teste e eletrônica dedicada inviabilizando esse método em aplicações com ênfase em aplicações de segurança.

Por isso, os testes devem ser realizados com a bateria funcionando, pois, uma parte das aplicações de baterias estacionárias envolve circuitos de segurança e a bateria é a garantia da não interrupção do circuito. Uma forma de extrair os parâmetros em tempo real é necessária e é uma das principais preocupações dos artigos e trabalhos estudados (HE et al, 2011; JUANG, 2010; LE; TANG, 2011).

Para que o projeto apresente uma solução abrangente, é importante que a análise seja realizada apesar de mudanças na temperatura, ou no tempo de carga, ou na corrente de carga e descarga, ou em qualquer outro parâmetro que mude a capacidade de uma bateria. Esse objetivo é importante já que o usuário pode não ter controle sobre essas variáveis externas e como explicam Arora, White e Doyle (1998) e Dubarry et al (2017) essas variáveis mudam a capacidade da bateria. Por isso, a falta de um modelo matemático satisfatório que relaciona todas essas variáveis justifica o uso de inteligência artificial.

Wang et al (2016) lembram que o monitoramento da bateria é imprescindível para segurança do sistema já que a capacidade da bateria depende de tantos parâmetros internos e externos. É necessário que a solução funcione com fabricantes e modelos diferentes de bateria já que é possível que se tenha duas ou mais opções de bateria

para a mesma aplicação. Como as baterias estão em constante evolução, é provável que a bateria de uma aplicação mude sem que o circuito mude. Portanto a solução não pode estar vinculada a um modelo de bateria. Assim a adaptatividade da solução é uma característica importante. Além disso, Dubarry et al (2017) lembram que materiais diferentes nos eletrodos fazem que as baterias de modelos diferentes envelheçam em ritmos diferentes. Além de apresentar soluções funcionais, é importante comparar as diferentes soluções usando rede neural, lógica fuzzy ou adaptabilidade, pois isso permite definir a solução ótima para determinada aplicação. Como as baterias de íons de lítio estão cada vez mais presentes no mercado e podem ser utilizadas em diversas aplicações, e elas fazem parte de diversos projetos, de baterias para celulares até HEV, há diversos estudos que tratam desse tema na literatura (COLEMAN; HURLEY; LEE, 2008; MUKHERJEE, 2003). Porém esses trabalhos normalmente não estabelecem um conjunto de parâmetros único já que a maioria foca em uma aplicação específica e no estudo de um determinado parâmetro de medição, não podendo ser comparados entre si. Isso resulta em uma falta de soluções para análise de baterias no mercado, como é mencionado por Xing et al (2011).

2. Modelos e parâmetros das baterias de íons de lítio

2.1. Descrição de uma bateria de lítio (“rocking chair”)

Existem diferentes tipos de baterias de íons de lítio e o que difere um tipo do outro é o material no catodo (BUCHMANN, 2015). Os materiais mais comuns são Cobalto e Manganês para o catodo e grafite para o anodo. Há também baterias de lítio polímero que possuem um eletrólito em gel que são normalmente montadas em embalagens de plástico (*pouch cells*). As vantagens das baterias *pouch cell* são a maior flexibilidade do formato (uma célula pode ter espessura de 1mm), pois pode ser organizada em lâminas que não precisam ser comprimidas, e a sua maior segurança à sobrecarga. Segundo Taiyou Research (2013), essas razões justificam o seu maior uso em veículos elétricos. Porém Choi e Aurbach (2016) lembram que as baterias cilíndricas possuem uma densidade energética 20% maior que as baterias do tipo *pouch cell*. Os três formatos mais populares são apresentados na figura 9:

Figura 9 - Formatos de bateria: a - cilíndrico. b - prismático. c - laminado ou pouch.

Fonte: Choi e Aurbach (2016).

O anodo é o eletrodo onde a reação de oxidação ocorre, liberando elétrons para o circuito e o catodo é o eletrodo onde a reação de redução ocorre, recebendo elétrons do circuito. Para uma bateria, o eletrodo positivo se comporta como catodo durante a descarga e anodo durante a carga. O contrário ocorre no eletrodo negativo. O padrão é chamar os eletrodos considerando a etapa de descarga, ou seja, o eletrodo positivo é o catodo e o negativo é o anodo.

Scorsati, Croce e Panero (2001) explicam que uma bateria de íons de lítio é produzida juntando materiais “pobres em lítio” que reagem com os íons de lítio no anodo (grafite é o mais comum LiC_6) com materiais “ricos em lítio” no catodo (exemplo: óxido de lítio

cobalto: LiCoO_2). Além disso, o eletrólito é formado por uma solução com íons de lítio (exemplo: LiPF_6). Essa troca de íons de lítio nas duas reações químicas (a de redução e a de oxidação) é uma vantagem desse tipo de bateria. Esse movimento de ida e volta dos íons de lítio ficou conhecido como o conceito da “*rocking chair*” (cadeira de balanço), onde os volumes de íons de lítio do catodo e anodo mudam durante a carga e a descarga e por isso a analogia com a cadeira de balanço (The Economist, 2008; BRODD, 2001).

Íons de lítio são armazenados no anodo entre camadas de carbono criando um potencial eletroquímico baixo o suficiente para o material se comportar como eletrodo negativo (IDOTA et al, 1997). Buchmann (2015) mostra diferentes tipos de catodos, vale ressaltar os mais usados: o óxido de lítio cobalto que é organizado em camadas como mostra a figura 10:

Figura 10 - Estrutura do catodo de Lítio-Cobalto.

Fonte: Buchmann (2015).

Outro exemplo é o óxido de Lítio Manganês que é organizado em cristais tridimensionais como mostra a figura 11:

Figura 11 - Estrutura do catodo de Lítio-Manganês.

Fonte: Buchmann (2015)

As equações (2.1 a 2.3) que descrevem as baterias de íons de lítio durante a carga são mostradas por Arora, White e Doyle (1998) e Gold Peak Industries Ltd (2003):

Essas equações valem para as baterias de óxido de lítio cobalto (LiCoO_2). As equações para os outros tipos de bateria são análogas.

2.2. Descrição dos parâmetros de medição da bateria

A capacidade de uma bateria é medida em Amperes-horas (Ah) ou miliamperes-horas (mAh). Os fornecedores usam também a escala em C para indicar a corrente que a bateria deve operar. 1C é a corrente que uma bateria precisa para carregar ou descarregar totalmente em uma hora. Por exemplo, uma bateria com capacidade de 1000mAh com uma carga de 0.25C (ou 250mA) deve funcionar por 4 horas com a sua capacidade nominal. Ou seja, a capacidade da bateria representa a quantidade de energia que ela possui. A resistência interna da bateria transforma parte da corrente em calor, por isso há uma pequena diferença entre o tempo de descarga prático e o teórico, quanto maior é a corrente de descarga em relação a nominal, menor é o tempo de descarga prático (BUCHMANN, 2015). Esse processo é descrito na figura 12 que compara a capacidade atingida com as diferentes correntes de descarga:

Figura 12 - Capacidade em função da descarga.

Fonte: Gold Peak Industries Ltd (2003).

Por isso os fabricantes normalmente indicam qual a corrente de descarga padrão para obter a capacidade nominal. Juang (2010) explica que esse fenômeno é descrito pela lei de Peukert:

$$K \times I^{n-1} = \text{constante} \quad , n > 1 \quad (2.4)$$

K é a capacidade da bateria em Ah, I é a corrente de descarga e n depende das características da bateria. Com n=1 representa a bateria ideal que não muda de acordo com a corrente de descarga. Segundo Juang (2010), n varia entre 1,2 e 1,5 para baterias comerciais.

Dois parâmetros essenciais para a análise do estado da bateria são o SOC (*State Of Charge* ou estado da carga) e o SOH (*State Of Health* ou estado de saúde).

➤ SOC: State Of Charge

O SOC descreve o quanto a bateria já foi descarregada em relação a sua capacidade nominal. Como esse parâmetro é escrito em porcentagem, 100% representa uma bateria com a carga igual a sua capacidade nominal e 0% representa uma bateria totalmente descarregada (LU et al, 2013).

Coleman, Hurley e Lee (2008) descrevem mais formalmente o SOC como a carga que resta na bateria descrita pela equação 2.5.

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{AHC} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

Na equação AHC é a capacidade nominal em Ah. Portanto o SOC é dependente da corrente que já foi fornecida, por isso um dos métodos para prever o SOC é contagem de Coulomb (JUANG, 2010). Medindo a corrente de saída é possível prever o quanto resta de carga na bateria. Para Hu et al (2015) o método de Coulomb necessita de uma medição de corrente precisa e normalmente de um ciclo completo de carga e descarga. Os outros métodos são a estimativa pela tensão nos terminais ou pela impedância de saída. O problema de estimar o SOC pela tensão nos terminais é que a impedância da descarga ou da carga influencia na medição e muitas vezes não é possível medir a tensão em circuito aberto (JUANG, 2010).

Xing et al (2011) enumeram os diferentes métodos para estimar o SOC, além da contagem de Coulomb é citado métodos que utilizam o filtro de Kalman, lógica fuzzy ou um modelo auto regressivo de médias móveis.

➤ SOH: State Of Health

Porém o SOC é inadequado para mostrar o estado de vida da bateria, pois uma bateria carregada terá um SOC de 100% independente se ela está envelhecida ou nova. Para isso serve o SOH. O SOH é definido como a relação entre a capacidade atual da bateria e a capacidade nominal da bateria (CHEN et al, 2013; LE; TANG, 2011).

$$SOH = \frac{C_{bat}}{C_{nominal}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Lu et al (2013) lembram que o SOH pode ser definido usando outros parâmetros da bateria como impedância, taxa de auto descarga ou densidade energética. Como o SOH é expresso em porcentagem, fica mais fácil comparar o estado de baterias com cargas nominais diferentes. Portanto o SOH quantifica o quanto a bateria envelheceu, tanto que Lu et al (2013) preferem chamar o parâmetro de SOL (*State of Life* ou estado de vida). Diferentes fontes (YANGA et al, 2017; LU et al, 2013; GOLD PEAK INDUSTRIES LTD, 2003; GROOT, 2012; XING et al, 2011; HE et al, 2011) explicam que a bateria atinge o fim da vida (EOL – End Of Life) quando o SOH chega entre 70 e 80%. He et al (2011) e Yanga et al (2017) lembram que uma bateria com SOH menor que 80% tem ciclos de carga e descarga muito instáveis, pois a sua perda de capacidade tem um caráter exponencial como é visto na figura 13:

Figura 13 - Capacidade em função do número de ciclos.

Fonte: He et al (2011).

He et al (2011) e Chen e Pecht (2012) descrevem a perda da capacidade em função do tempo com a equação 2.7.

$$K = ae^{bt} + ce^{dt} \quad (2.7)$$

Na equação K é a capacidade da bateria, t é o número de ciclos, a e b são relacionados à impedância interna e c e d são relacionados à taxa de envelhecimento (HE et al, 2011).

Xing et al (2011) relacionam três componentes comerciais que gerenciam baterias (Maxim DS2726, TI BQ78PL114 e O2 Micro OZ890) e nenhum deles faz o cálculo do SOH apesar de este parâmetro ser importante para definir quando é necessário trocar a bateria. Para Xing et al (2011), isso se deve pela dificuldade de medir o SOH, pois o SOH varia de acordo com a temperatura e com a corrente de descarga como é visto nas figuras 14 e 15.

Figura 14 - Evolução do SOH em função da carga e da temperatura.

Fonte: Xing et al (2011).

Figura 15 - Evolução do SOH em função da carga.

Fonte: Buchmann (2015).

Apesar disso, a *Apple* fornece nas versões posteriores ao IOS 11.3 informações sobre o SOH da bateria do *Iphone* (APPLE, 2019). Apesar da informação de como esse valor é calculado não ser divulgada, é possível inferir pelas informações descritas no site (APPLE, 2019) que o celular conta o número de ciclos de carga e descarga e compara com o uso em celulares parecidos. Além disso, a Apple (2019) descreve um ciclo de carga e descarga de uma forma diferente do que é comum na literatura e nos *datasheets* de baterias (anexos A, B e C). Para a Apple (2019), um ciclo completo é considerado quando a bateria for descarregada com uma quantidade equivalente à sua capacidade nominal independente se houve carga da bateria durante esse processo. Na literatura, um ciclo completo é considerado quando a bateria é descarregada completamente após uma carga completa. Como na maioria das aplicações não é possível obter o controle do processo e a quantidade de dados que a Apple possui das baterias usadas, a medição do SOH continua um desafio, principalmente em baterias estacionárias voltadas à segurança que normalmente não são descarregadas constantemente.

Além disso, Dubarry et al (2017) concluem que o SOH é dependente das condições de vida da bateria e que por isso cada bateria degrada de forma diferente, o que justifica uma análise profunda do SOH para um melhor gerenciamento da bateria, principalmente em aplicações de segurança que possuem condições particulares comparadas a outras aplicações. E Remmlingera et al (2011) argumentam que o

conhecimento do SOH permite identificar uma degradação abrupta da bateria e é necessário para uma operação segura.

Portanto é complicado utilizar os estudos em laboratórios em uma solução comercial onde há variação na temperatura, na corrente de descarga e no modelo de bateria principalmente em casos onde essas informações não são conhecidas. Por isso Saha, Goebel e Christophersen (2009) argumentam que um sistema confiável de estimativa de SOC e SOH traria uma ajuda significativa a qualquer sistema envolvendo baterias.

➤ Outros parâmetros

Outro conceito usado no estudo de baterias é o SOF (*State of Function* ou estado de funcionalidade). Para Lu et al (2013), o SOC mostra o quanto a bateria difere de uma bateria carregada e o SOH mostra o quanto uma bateria difere de uma bateria nova. Para Lu et al (2013) o SOF pode ser medido em porcentagem e indica a performance atual da bateria. Juang (2010) classifica o SOF como uma pergunta de Sim ou Não que indica se a bateria está apta a realizar determinada função de uma aplicação. O exemplo mais comum é se a bateria do carro tem carga suficiente para ligá-lo. O SOF depende do SOH e principalmente do SOC. Lu et al (2013) usam a figura 16 para explicar a relação entre esses parâmetros:

Figura 16 - Relação entre o SOC, o SOH e o SOF.

Fonte: Lu et al (2013).

Na figura 16, o SOH mínimo representa o ponto de fim de vida (EOL) e as diferentes curvas representam os diferentes SOF, ou seja, os diferentes estados de performance da bateria. Portanto quanto mais velha a bateria fica (menor SOH), menor a sua performance (SOF) para um mesmo estado de carga (SOC). Para Chiang, Sean e Ke (2011), o SOF é mais importante para o gerenciamento de baterias, principalmente em veículos elétricos, para evitar falhas durante a operação.

Os estudos do SOC e do SOH fazem parte de um estudo mais amplo: gerenciamento de prognósticos e saúde (*Prognostics and health management* ou PHM). Na literatura fala-se também do BMS (*Battery Management System*) que engloba o estudo do SOC, do SOH e do SOF. Lu et al (2013) argumentam que não há um consenso sobre a exata definição de BMS, já que o sistema pode envolver diversas soluções eletrônicas ou mecânicas e a bateria gerenciada pode ser de qualquer tipo ou ser um conjunto de baterias. He et al (2011) explicam que o PHM utiliza de métodos e tecnologias para garantir o bom funcionamento de um produto evitando falhas e riscos durante a sua vida útil, ou seja, o PHM utiliza sensores e modelos da bateria para garantir a qualidade da bateria e melhorar a manutenção (SBARUFATTI et al, 2017). Para He et al (2011), o PHM de uma bateria pode ser dividido em 2 métodos: física da falha (*physics-of-failure* ou PoF) e orientação por dados. Enquanto o método PoF é mais completo pois estima os problemas e riscos que a bateria pode sofrer com o conhecimento de sua física, o método por orientação por dados utiliza de estudos estatísticos de diferentes parâmetros da bateria para estimar possíveis falhas. Um dos objetivos desses métodos é prever a vida útil remanescente (*remaining useful life* ou RUL). O RUL é o tempo remanescente até um ponto de falha ou EOL considerando o sistema em que a bateria está inserida.

Como já foi explicado, a bateria atinge o EOL entre 70% (XING et al, 2011) e 80% (YANGA et al, 2017; CHEN; PECHT, 2012) de SOH dependendo da fonte e dependendo da aplicação (por exemplo, baterias de satélites têm um EOL menor porque são carregadas periodicamente). Juang (2010) lembra que esse ponto de corte é arbitrário e vários elementos da aplicação devem ser levados em conta ao determiná-lo (como curva de corrente, temperatura e números de ciclos). O nome usado por Xing et al (2011) para o conceito do EOL é estado de vida (State of Life ou SOL). Para esse trabalho definiu-se o EOL em 72%. Esse valor foi escolhido levando em conta os dados obtidos das baterias testadas, a aplicação dessas baterias em

soluções de segurança e os comportamentos obtidos com cada método escolhido. É importante notar que para aplicações de segurança, a escolha do valor de EOL é crucial já que ao mesmo tempo garante o SOF da bateria para determinada aplicação e otimiza o momento de troca da bateria, reduzindo custo. Essa escolha, portanto, varia de caso a caso e não influi nos métodos utilizados mas deve ser projetada considerando que abaixo desse valor as baterias têm um comportamento instável em relação à sua capacidade.

Os autores Chen e Pecht (2012) e Saha, Goebel e Christophersen (2007, 2009) utilizam modelos parecidos para calcular o RUL. Eles introduzem um erro Gaussiano à equação de decaimento da capacidade e com teoria estatística Bayesiana, eles descrevem uma função de densidade probabilística (*probability density function* ou PDF) do RUL. Como o erro introduzido foi Gaussiano, a PDF será uma distribuição gaussiana (SAHA; GOEBEL; CHRISTOPHERSEN, 2009). Essa previsão é atualizada com os novos dados para compensar variações de cada caso usando o algoritmo de *particle filtering* (PF). He et al (2011) realizam algo parecido para prever a evolução do SOH e descrever a PDF do RUL, obtendo gráficos como o gráfico da figura 17.

Figura 17 - Previsão da evolução do SOH.

Fonte: He et al (2011).

2.3. *Justificativas para o envelhecimento das baterias*

As baterias de íons de lítio devem funcionar em uma faixa de temperatura e tensão que depende do material usado na fabricação. Por exemplo, as baterias usadas nesse projeto podem ser descarregadas em temperaturas de -20 a 60°C e carregadas entre 0 e 45°C (ver anexos A, B e C). Segundo Lu et al (2013), se a bateria operar fora dessas faixas de temperatura e tensão, a performance e a segurança da bateria são comprometidas.

Arora, White e Doyle (1998) descrevem detalhadamente os diferentes processos eletroquímicos que podem causar perda da capacidade da bateria, ou seja, envelhecimento da bateria:

➤ **Sobrecarga**

É possível ter sobrecarga nos eletrodos positivo e negativo e no processo de oxidação do eletrólito (ARORA, WHITE E DOYLE, 1998). Além de problemas na perda de capacidade da bateria, a sobrecarga pode criar sérios problemas de segurança com a liberação de gases inflamáveis dentro da bateria, estufando a bateria. Portanto a tensão máxima de carga influi na evolução do SOH como mostra a figura 18.

Figura 18 - Evolução do SOH em função da tensão máxima de carga.

Fonte: Buchmann (2015)

➤ **Coletores de corrente**

Cobre (no eletrodo negativo) e alumínio (no eletrodo positivo) são os mais usados coletores de corrente (ARORA, WHITE E DOYLE, 1998). E se esses metais sofrerem

corrosão, a resistência interna da bateria aumentará diminuindo a capacidade da bateria.

➤ Auto descarga

Esse processo acontece em todos os tipos de bateria e ele é mais crítico em outros tipos de bateria (BUCHMANN, 2015). Se a bateria não for carregada nem descarregada, ela perderá um pouco de carga ao longo do tempo. Auto descargas longas ou repetidas podem desregular a razão entre as massas de lítio ativas em cada eletrodo afetando a carga da bateria e consequentemente a sua capacidade máxima (ARORA, WHITE E DOYLE, 1998). A auto descarga aumenta com a temperatura e com a tensão da bateria, por isso as baterias não podem ser armazenadas em temperaturas acima de 60°C (GOLD PEAK INDUSTRIES LTD, 2003). Elas também devem ser armazenadas com 50% a 70% da carga. Em certas aplicações a bateria não é carregada até a carga máxima para prolongar o tempo de vida, mantendo a bateria com uma fração da capacidade máxima. A tensão de carga máxima para uma vida máxima da bateria de íons de lítio é de 3,92V, porém isso diminui a capacidade da bateria em até 60% (BUCHMANN, 2015). Além disso, os fabricantes vendem as baterias com 40% a 60% da carga total para diminuir o efeito da auto descarga enquanto a bateria não for usada. A auto descarga é de cerca de 5% nas primeiras 24hs e de 1 a 2% por mês (BUCHMANN, 2015). Portanto o aumento da temperatura ou o armazenamento em alto SOC envelhecem mais a bateria como pode ser observado na figura 19.

Figura 19 - Evolução da Capacidade em função da temperatura e SOC.

Fonte: Buchmann (2015).

➤ **Redução do eletrólito**

Arora, White e Doyle (1998) explicam que a redução do eletrólito é um processo esperado em células com eletrodo com carbono como base. Além de poder causar perda de capacidade da bateria, a redução do eletrólito pode causar liberação de gases em temperaturas mais altas reduzindo a temperatura máxima de segurança.

➤ **Período de formação e passivação**

Nos primeiros ciclos de carga e descarga ocorre o processo de passivação do eletrodo de carbono reduzindo a massa de lítio ativa nesse eletrodo, desestabilizando assim a relação entre massas de lítio ativas em cada eletrodo (ARORA, WHITE E DOYLE, 1998), que diminuiu a capacidade da bateria. Por isso os fabricantes costumam utilizar um pouco mais de lítio no catodo do que o cálculo teórico para compensar essa desestabilização.

A passivação cria também uma perda da capacidade das baterias nos primeiros ciclos de carga e descarga (ARORA, WHITE E DOYLE, 1998). A consequência disso é que os fabricantes precisam realizar alguns ciclos de carga e descarga em temperaturas definidas até que a capacidade da bateria se estabilize, esses ciclos são necessários para evitar o aumento da resistência interna da bateria (BUCHMANN, 2015).

➤ **Dissolução do material ativo**

Quando o material do eletrodo positivo foi totalmente descarregado, pode ocorrer a dissolução do material (exemplo do manganês) diminuindo a quantidade de material ativo. Além de diminuir a capacidade da bateria, isso pode causar aumento da resistência interna (ARORA, WHITE E DOYLE, 1998).

➤ **Troca de fase**

Segundo Arora, White e Doyle (1998), o processo de troca de fase é inevitável com a diminuição dos íons de lítio no eletrodo positivo. A estrutura do material muda de forma de acordo com a quantidade de íon de lítio e do material do catodo. O problema pode acontecer quando há sobrecarga ou descarga excessiva no eletrodo positivo, piorando a dissolução do material ativo. Se as baterias forem descarregadas com uma corrente maior que o especificado, elas envelhecem mais rápido como é visto na figura 20.

Figura 20 - Evolução da Capacidade em função da corrente de descarga.

Fonte: Buchmann (2015)

2.4. Modelo da bateria

Diversas fontes (XING et al, 2011; SAHA; GOEBEL; CHRISTOPHERSEN, 2007, 2009) usam o modelo de Randle para modelar uma bateria de íons de lítio enquanto Juang (2010) usa o mesmo modelo para uma bateria de chumbo ácido. O modelo pode ser visto na figura 21:

Figura 21 - Modelo de Randle de uma bateria.

Fonte: Autor

Segundo Saha, Goebel e Christophersen (2009), os parâmetros do modelo são:

- A capacitância de dupla camada C_{DL}
- A resistência de transferência de carga R_{CT}
- A resistência de Warburg R_W
- A resistência do eletrólito R_E .

Juang (2010) explica que a resistência R_E é responsável pela resposta dinâmica a uma carga e que o capacitor C_{DL} e as resistências R_W e R_{CT} representam as reações

nos eletrodos. A resistência R_W e a capacitância C_{DL} são normalmente ignoradas para estimar a perda de capacidade de uma bateria e há uma correlação entre a perda da capacidade e a resistência $R_{CT} + R_E$ (SAHA; GOEBEL; CHRISTOPHERSEN, 2007, 2009). Xing et al (2011) e Juang (2010) ignoram a resistência R_W ou incorporam em R_{CT} . Algumas causas do envelhecimento da bateria resultam em um aumento da resistência interna, por isso é possível estimar parâmetros da bateria com a resistência interna. Chiang, Sean e Ke (2011) citam outros modelos que utilizam circuitos RC em série ou composto somente de resistências. Porém Remmlinger et al (2011) argumentam que a resistência interna é mais dependente da temperatura do que da degradação da bateria, ou seja, não seria o método ideal se a temperatura for uma variável considerável.

2.5. Exemplo de circuito de proteção

Para garantir a segurança contra variações de temperatura e corrente, as baterias possuem circuitos de proteção. Buchmann (2015) descreve vários tipos de circuitos de proteção que podem ser usados em conjunto: fusíveis que abrem com uma corrente determinada, um circuito PTC (*positive thermal coefficient*) que aumenta a resistência interna com alta corrente, circuito CID (*circuit interrupt device*) que corta o circuito em caso de alta pressão na célula, chaves de estado sólido que desconectam o circuito se necessário e um sistema de ventilação caso seja necessário liberar gás. O circuito também protege contra curto circuito dos terminais das baterias. Na foto da figura 22 é possível visualizar o circuito de proteção de uma bateria:

Figura 22 - Circuito de proteção em bateria de íons de lítio.

Fonte: Autor

O circuito de proteção dessa bateria possui dois chips, o FS312F-P e o FS8205A, ambos da empresa Fortune. O FS8205A é um chip que possui dois MOSFET canal N

com o dreno curto circuitado. O FS312F-P que faz o controle da bateria, o circuito padrão está na figura 23.

Figura 23 - Circuito de proteção da bateria de íons de lítio.

Fonte: Datasheet FS312F-P (Anexo E)

O chip FS312F-P controla a carga e a descarga da bateria acionando ou desligando os MOSFETs de carga e descarga. O pino CS detecta a carga da bateria e também uma sobre corrente. No datasheet que se encontra no anexo E há as diferentes situações que fazem o chip agir (por exemplo: tensão de sobre carga). Esse circuito contribui para a auto descarga da bateria, pois há uma corrente quiescente de $3\mu\text{A}$.

3. Método experimental

3.1. *Escolha do modelo*

Para atender os objetivos do projeto, optou-se por utilizar o modelo da bateria de Randle sem diferenciar a resistência de transferência de carga R_{CT} e a resistência de Warburg R_W . Como o objetivo é utilizar um firmware e hardware que possa ser incorporada à solução já embarcada, não foi possível fazer uma análise que possa diferenciar todos os componentes do modelo. Yanga et al (2017), Sbarufatti et al (2017) e Dubarry et al (2017) diferenciam modelos baseados em dados (rede neural é um exemplo) de modelos baseados em técnicas experimentais e teóricas (exemplo: EIS) que são mais custosos. Por isso o teste mais comum é a medição da soma de todas as resistências internas como é feito por Saha, Goebel e Christophersen (2009).

3.2. *Cálculos de resistência e capacitância usando o ADC do microcontrolador*

Para estimar as resistências e a capacitância do modelo de Randle, a tensão da bateria foi medida de 20 em 20 milissegundos pelo ADC do microcontrolador depois de inserir uma resistência conhecida. Essa diferença de tempo foi escolhida para que o ADC possa medir e o microcontrolador registrar a tensão da bateria. Essa técnica é parecida à técnica descrita por Buchmann (2015) e utilizada por Saha, Goebel e Christophersen (2009).

O objetivo é estimar a resistência R_E , a resistência R_D ($R_D = R_{CT} + R_W$) e a capacitância C_{DL} . A resistência de carga R_C escolhida foi de $9,333\Omega$, formada por seis resistores de 56Ω em paralelo. O valor de R_C foi escolhido para que a queda de tensão fosse grande o suficiente para ser medida pelo ADC. O circuito equivalente é o da figura 24, gerado no software Pspice. Os valores de R_E , C e R_D são os valores medidos de uma bateria usada como exemplo. O valor da tensão em aberto da bateria escolhido ($4,19V$) é o mesmo da tensão de corte da carga das baterias. E o valor de “tClose = 20ms” indica quando a chave é fechada.

Figura 24 - Circuito modelo do teste para estimar os parâmetros da bateria.

Fonte: Autor

No Pspice foi gerado o gráfico da figura 25 simulando a curva de tensão na saída da bateria (ponto “V” na figura 24).

Figura 25 - Tensão na saída da bateria durante o teste.

Fonte: Autor

O capacitor se comporta como um curto no instante $t=0^+$, portanto há uma queda imediata na tensão de saída até uma tensão V_d . Essa tensão é representada pela fórmula da equação 3.1.

$$Vd = \frac{V_{BAT} \times R_c}{R_e + R_c} \quad (3.1)$$

Como é conhecido R_c é possível determinar R_e com a equação 3.2.

$$R_e = \frac{R_c \times (V_{BAT} - V_d)}{V_d} \quad (3.2)$$

Após a carga completa do capacitor, a tensão de saída da bateria V_{BAT} só depende das resistências internas, portanto a tensão de regime V_x é calculada pela equação 3.3.

$$V_x(\infty) = \frac{V_{BAT} \times R_c}{R_d + R_e + R_c} \quad (3.3)$$

Considerando $R_x = R_d + R_e$, é obtido o valor de R_x pela equação 3.4.

$$R_x = \frac{R_c \times (V_{BAT} - V_x)}{V_x} \quad (3.4)$$

Para obter-se a equação da capacitância, é preciso definir o circuito equivalente de Thévenin para simplificar a análise. A resistência equivalente de Thévenin R_{th} é definida pela resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito da figura 26.

Figura 26 - Circuito equivalente para o cálculo da resistência de Thévenin.

Fonte: Autor

Portanto R_{th} é definida pela equação 3.5.

$$R_{th} = \frac{R_d \times (R_e + R_c)}{R_d + R_e + R_c} \quad (3.5)$$

A tensão de Thévenin é igual à tensão em aberto V_{BAT} da bateria nesse caso. O circuito resultante é mostrado na figura 27.

Figura 27 - Circuito equivalente de Thévenin.

Fonte: Autor

A tensão $V_c(t)$ no capacitor terá a fórmula 3.6.

$$V_c(t) = V_c(\infty) \times (1 - e^{\frac{-t}{R_{th} \times C}}) \quad (3.6)$$

Sendo $V_c(\infty)$ definido pela fórmula 3.7.

$$V_c(\infty) = V_{BAT} \times (1 - \frac{R_e + R}{R_d + R_e + R_c}) \quad (3.7)$$

Assim, é definida a tensão de saída da bateria V_x em função de V_c pela equação 3.8.

$$V_x(t) = (\frac{R_c}{R_e + R_c}) \times (V_{BAT} - V_c(t)) \quad (3.8)$$

Portanto é possível estimar a capacitância com a curva da tensão de saída da bateria. Para validar o método, comparou-se os valores medidos da tensão de uma bateria com simulações Spice empregando os valores de capacitância e resistência estimados. Os valores medidos estão na tabela 1 e os parâmetros calculados na tabela 2.

Tabela 1 - Registro das tensões da bateria nos primeiros 400ms de teste exemplo

Tempo em milissegundos	Tensão medida em Volts
0	4.159
20	4.156
40	4.037
60	4.035
80	4.035
100	4.035
120	4.035
140	4.035
160	4.037
180	4.034
200	4.034
220	4.035
240	4.034
260	4.037
280	4.035
300	4.037
320	4.035
340	4.03
360	4.032
380	4.032

Fonte: Autor

Tabela 2 - Valores estimados do modelo de Randle de um teste exemplo.

Parâmetros	Valor
Re	0.006737 Ω
Rd	0.281358 Ω
Rx	0.288095 Ω
Rc	9.333333 Ω
Vbat	4.159 V
C	0.018918 F

Fonte: Autor

Com esses valores, é obtido o gráfico medido pelo microcontrolador e o gráfico da simulação do Pspice para comparar na figura 28:

Figura 28 - Comparação entre a simulação e os valores medidos.

Fonte: Autor

3.3. Descrição do Hardware

Um microcontrolador foi utilizado para realizar as medições descritas anteriormente. O microcontrolador utilizado foi o LPC1778 da NXP, um microcontrolador de arquitetura ARM Cortex M3. As especificações deste microcontrolador estão no anexo D. Seria possível realizar as mesmas operações com um microcontrolador com uma capacidade computacional mais simples, já que para as únicas funcionalidades necessárias são uma medição de ADC e pinos para comunicar com uma memória externa. Uma EEPROM de 512kB de memória foi utilizada para armazenar os dados que eram transferidos para o PC via USB. Além disso, foi utilizado uma fonte externa AC/DC de 24V que alimentava o circuito de carga e descarga da bateria e a fonte de alimentação do microcontrolador. O circuito de carga está na figura 29:

Figura 29 - Circuito de carga das baterias.

Fonte: Autor

O sinal “LOAD_BATTERY” é usado para chavear o carregador controlando assim a corrente de carga e mantendo a potência dissipada nos resistores de carga. O circuito de descarga tem funcionamento parecido como é mostrado figura 30:

Figura 30 - Circuito de descarga das baterias.

Fonte: Autor

Os sinais “P1.6_TEST_BATTERY” e “P1.15_TEST_BATTERY” são usados para controlar a corrente média de descarga em 250mA ou em 450mA.

21 baterias de três tipos diferentes foram testadas, todas de lítio polímero:

- 7 baterias da HCT (PN: HCT053759P) de 1150mAh.
- 7 baterias da Expower (PN: 483757) de 1000mAh.
- 7 baterias da Expower (PN: 483759) de 1000mAh.

Os *datasheets* dessas baterias se encontram em anexo (anexos A, B e C).

Na figura 31 é mostrada uma foto de todos os modelos de baterias que são todas do tipo *pouch*:

Figura 31 - Foto dos 3 tipos de baterias testadas.

Fonte: Autor

3.4. Descrição do firmware

O firmware de teste possui três conjuntos de funções. Extratos do FW estão no apêndice A.

➤ Função de log

A leitura do log é executada no fim de cada ciclo de carga e descarga. O log é enviado via USB para o PC e esse log é tratado por um programa de planilhas. O log possui até 2048 registros de 8 bytes cada. Cada registro possui os seguintes parâmetros:

- Hora do log
- Minuto do log
- Segundo do log
- Registro não utilizado
- Valor do ADC da bateria (1º byte)
- Valor do ADC da bateria (2º byte)
- Valor do ADC do carregador da bateria (1º byte)
- Valor do ADC do carregador da bateria (2º byte)

Apesar de registrar o valor do ADC do carregador da bateria (“AD6_Charger_Out”), essa informação não é considerada na análise. Antes de cada ciclo de carga e descarga, o log é apagado.

Nos primeiros 400 milissegundos de descarga, o valor do log é computado, mas os bytes que indicam o horário são ignorados já que são irrelevantes para essas medidas.

➤ Função de carga

O FW lê a tensão da bateria para determinar qual é a corrente de carga atual. O objetivo é limitar a potência média nos resistores de carga. A cada 30 segundos um log é registrado. A curva de carga não é importante para a análise, mas é importante que todas as baterias tenham sido carregadas da mesma forma, já que a forma de carregar influencia na capacidade da bateria. Quando a tensão da bateria atinge 4,19V o FW inicia automaticamente a função de descarga. Esse valor foi escolhido pois inicialmente a carga seria realizada com o carregador de baterias MCP73871 da Microchip e este é valor de carga máxima desse componente. Ao mudar a forma de carga das baterias, manteve-se o valor.

➤ Função de descarga

Antes da descarga, o carregador é desligado e a bateria é mantida em aberto por 2 segundos para que o carregador não influa na medida. O valor da bateria é registrado antes de iniciar a descarga. Nos primeiros 400ms a bateria é descarregada com 450mA para medir a resistência e capacitância do modelo de Randle e durante esse processo o valor da tensão da bateria é armazenada na memória a cada 20ms. Na segunda etapa, a bateria é descarregada com uma corrente média de 250mA. Para garantir essa corrente média, o FW controla a descarga da bateria chaveando os sinais “P1.6_TEST_BATTERY” e “P1.15_TEST_BATTERY” com uma forma de onda quadrada de período de 50 milissegundos. O fator de ciclo (duty cycle) desse sinal é definido pela tensão da bateria para que a corrente de descarga seja próxima de 250mA e todas as baterias sejam descarregadas da mesma forma. A tabela 3 mostra os valores de fator de ciclo e as respectivas correntes de descarga.

Tabela 3 - Definição do fator de ciclo da descarga.

Tensão da bateria em Volts	Tempo em estado ativo em milissegundos	Fator de ciclo em porcentagem	Corrente de descarga em miliAmperes
3	39,00	0,78	252
3,06	38,00	0,76	250
3,12	37,00	0,74	248
3,18	37,00	0,74	253
3,24	36,00	0,72	251
3,3	35,00	0,7	248
3,36	35,00	0,7	253
3,42	34,00	0,68	250
3,48	33,00	0,66	247
3,54	33,00	0,66	251
3,6	32,00	0,64	248
3,66	32,00	0,64	252
3,72	31,00	0,62	248
3,78	31,00	0,62	252
3,84	30,00	0,6	248
3,9	30,00	0,6	252
3,96	29,00	0,58	247
4,02	29,00	0,58	251
4,08	28,00	0,56	246
4,14	28,00	0,56	249
4,2	28,00	0,56	253

Fonte: Autor

A cada 30 segundos a tensão da bateria é registrada no log e quando a tensão da bateria atinge 3V, o ciclo é interrompido.

3.5. *Tratamento dos dados experimentais*

O cálculo das resistências do modelo de Randle é feito em uma tabela de Excel. Um documento de Excel foi criado para cada bateria, assim é possível compilar todas as curvas de carga e descarga e compará-las. Além disso, são compiladas nesses documentos as curvas do início da descarga de cada bateria. Com a curva de carga e descarga é possível determinar a capacidade da bateria pelo tempo de descarga, e assim estimar o SOH da bateria.

4. Análise dos dados obtidos

4.1. Análise inicial dos dados

Foram feitas 1050 medições divididas em 50 medições por bateria.

Para cada bateria foi gerado um gráfico com as curvas de carga e descarga e as curvas dos primeiros 400ms de descarga. A seguir, nas figuras 32 e 33 são apresentados esses gráficos para a bateria 2.

Figura 32 - Curvas de carga e descarga da bateria 2.

Fonte: Autor

Figura 33 - Curvas do início da descarga da bateria 2.

Fonte: Autor

A primeira curva de carga e descarga tem um tempo de carga menor porque a bateria já estava carregada. O tempo de descarga dessa bateria permaneceu entre 3hs30 e 3hs50 com pequenas variações, ou seja, o envelhecimento desta bateria ainda está controlado, ou seja, está variando pouco entre cada medida e não chegou no fim de vida. Outras baterias analisadas tiveram mudanças maiores entre os tempos de descarga. Porém a mudança sempre foi percebida no início da descarga. Quanto maior a queda de tensão no início e por consequência uma maior resistência, menor era o tempo de descarga, portanto menor era a capacidade da bateria.

Os gráficos da capacitância (figura 34) e da resistência (figura 35) em função do SOH mostram essa evolução. Para realizar a análise da evolução da resistência, a resistência R_x , ou seja, a soma das resistências internas foi escolhida para obter uma análise mais precisa, já que nos cálculos, a resistência R_e é menor e muito próxima de zero.

Figura 34 - Relação entre a capacitância e o SOH.

Fonte: Autor

Figura 35 - Relação entre a resistência Rx e o SOH.

Fonte: Autor

Os dados completos estão nos apêndices. Para comparar a resistência e capacitância entre os vários modelos de bateria, criou-se os gráficos das figuras 36 e 37, onde cada cor representa um modelo de bateria diferente.

Figura 36 - Relação entre a resistência Rx e o SOH dividido por modelo de bateria.

Fonte: Autor

Figura 37 - Relação entre a capacitância e o SOH dividido por modelo de bateria.

Fonte: Autor

É possível observar que a resistência tem uma relação linear com o SOH e que a relação muda entre cada modelo de bateria, confirmando com o que é observado por Xing et al (2011). Por isso, é tão impreciso medir o SOH de uma bateria somente pela resistência. É possível analisar a evolução de uma bateria específica e estimar o seu SOH com o aumento da resistência interna, porém esse método não pode ser generalizado para um conjunto de baterias e, além disso, depende de uma confirmação do SOH real em cada medida. Esse método é inviável em muitas aplicações, principalmente em baterias estacionárias com ênfase em aplicações de segurança, onde não é possível descarregar a bateria para realizar os testes ou quando os testes devem ser realizados em tempo real.

A relação da capacitância e do SOH não é linear, porém é possível tirar as mesmas conclusões, pois há no gráfico áreas definidas pelos modelos das baterias. Portanto uma análise completa dos dados deveria levar em conta qual é o modelo da bateria, algo que não é factível em certas aplicações comerciais onde baterias de diferentes fabricantes são utilizadas.

4.2. *Problemas e imperfeições na medição*

Como foi mencionado anteriormente, o SOH é medido como a relação entre a capacidade atual da bateria e a capacidade nominal. O problema que isso causa para os testes realizados é que o SOH fica dependente da temperatura, da corrente de carga, da corrente de descarga e do modo que é realizada a carga (GOLD PEAK INDUSTRIES LTD, 2003; XING et al, 2011). Certas condições foram definidas para a realização dos testes, mesmo assim o SOH das baterias não evoluiu de uma maneira controlada nos testes realizados. O principal fator para isso deve ser a variação de temperatura já que os testes foram realizados em condições ambientes. Porém os valores dos componentes do modelo de Randle variaram de acordo ao tempo de descarga da bateria, mostrando-se, em um primeiro momento, uma forma eficiente de prever a capacidade atual da bateria. A capacidade de baterias com SOH baixo é instável, ou seja, a capacidade pode mudar de ciclo para ciclo. Algumas baterias foram escolhidas por estarem nessa condição, assim pode-se medir a resistência e capacitância para diferentes valores de SOH (de 20% a 110%). Foi medido valores de SOH acima de 100%, e isso pode ser explicado por algumas baterias testadas serem novas e apresentarem capacidade um pouco acima da nominal. Isso acontece normalmente na primeira descarga.

É possível visualizar essas imperfeições na diferença entre a variação do SOH em função dos ciclos de carga e descarga de duas baterias nas figuras 38 e 39. Enquanto a bateria 3 apresenta uma diminuição do SOH regular até a 19ª medida, o gráfico da bateria 1 é mais instável, mudando o SOH de ciclo a ciclo. Após a 19ª medida, o gráfico da bateria 3 demonstra uma instabilidade, porém continua a sua tendência de queda. Essa diferença acontece mesmo com baterias do mesmo modelo (que é o caso das baterias 1 e 3). Porém é importante notar que a resistência e a capacitância medidas acompanham essas mudanças. Os valores das resistências e das capacitâncias estão em porcentagem em relação à primeira medida para melhor visualização:

Figura 38 - Evolução do SOH, da resistência Rx e da capacitância ciclo a ciclo da bateria 1.

Fonte: Autor

Figura 39 - Evolução do SOH, da resistência Rx e da capacitância ciclo a ciclo da bateria 3.

Fonte: Autor

Poucas medições atingiram 100% de SOH. O motivo principal foi que a tensão máxima de carga foi 4,19V e após a bateria atingir essa tensão, a carga foi interrompida. Normalmente, há uma segunda etapa da carga com tensão constante o que aumentaria a capacidade da bateria, porém aumentando ao mesmo tempo a taxa de envelhecimento. Ao carregar a bateria dessa maneira foi possível realizar testes em diversas faixas de SOH.

As medições realizadas possuem outras limitações, como por exemplo, o tempo de medição do ADC. A medição não é imediata e tem um tempo de duração o que implica diretamente na estimativa dos componentes do modelo de Randle. O ciclo de medição (aquisição e gravação dos dados) não pode durar mais tempo que 20ms.

Além disso, o valor de R_e é pequeno, por isso muitas vezes o valor estimado é 0Ω e em alguns casos isso acarreta em erros nos cálculos. Por exemplo, a tensão medida entre o circuito em aberto e o tempo $t=0^+$ sendo próxima de 0V, as vezes pode

acontecer da segunda medição da tensão ser arredondada para cima, criando valores errados e negativos de Re . Quando isso acontece, definiu-se $Re=0$.

Outro problema acontece ao medir a tensão $V_x(\infty)$, a tensão que o circuito se estabiliza depois de colocar a carga. Para fazer essa medição, é considerada a média das últimas 15 medidas, porém se essas medidas não variarem muito, esse método pode acarretar em erros na medição da capacitância do modelo.

Todos esses erros em certas medições são esperados já que foi escolhido um método de medição mais abrangente que prioriza a flexibilidade entre aplicações. Esses problemas ocorreriam em qualquer aplicação que tentar estimar esses parâmetros, portanto é necessário projetar soluções para reconhecer esses erros e corrigi-los. Em aplicações que possuem baterias estacionárias, esses problemas são facilmente contornados descartando as medidas e refazendo os testes já que os testes nesse tipo de bateria poderiam ser realizados em grandes intervalos de tempo.

5. Base teórica dos métodos

5.1. Redes neurais

Mukherjee (2003) compila as diferentes publicações que usam redes neurais e lógica fuzzy em BMS, para medir principalmente o SOC e o SOH de baterias. Mukherjee (2003) e O’Gorman et al (2008) justificam que o uso de redes neurais para esse propósito é vantajoso porque a análise deixa de ser estática e depende menos dos dados adquiridos em laboratórios. Como os parâmetros variam de modelo para modelo e de bateria para bateria, o uso de redes neurais na análise seria uma maneira de contornar isso por ser um método adaptativo e como lembram Lu et al (2013) a rede neural não leva em consideração as particularidades de cada bateria, sendo assim um método mais generalista. Outra vantagem das redes neurais é ser um método que pode ser atualizado enquanto a aplicação está funcionando, se for possível comunicar com o microcontrolador. O’Gorman et al (2008) explicam outras vantagens das redes neurais como a baixa complexidade computacional desse método. Além disso, é dito que ao usar redes neurais não é necessário completo conhecimento de todos os processos químicos da bateria, nem é necessário descrever todos esses processos. Portanto usando redes neurais é possível economizar tempo na análise e na medição dos parâmetros (O’GORMAN et al, 2008). Uma desvantagem das redes neurais apontada por Lu et al (2013) é a dependência de uma grande base de dados por isso deve-se tomar cuidado para que a rede neural não seja dependente dos dados de treinamento evitando assim um sobre ajustamento (*overfitting*).

Chan, Lo e Shen (2000) usam uma rede neural para estimar a capacidade de uma bateria de chumbo ácido usando a corrente de descarga como entrada, a rede neural foi comparada com métodos usando a lei de Peukert. O’Gorman et al (2008) usam uma rede neural para simular o comportamento de uma bateria durante a descarga. O objetivo dessa rede neural é ser um modelo eletroquímico que conseguiria prever o comportamento da bateria com diferentes correntes de descarga.

A base de uma rede neural é um *perceptron* composto por um vetor $\{X\}$ de entrada $(X_1, X_2, \dots, X_N)$. Cada entrada X_N é multiplicada por um peso W_N do vetor de pesos $\{W\}$ e somada como exemplifica a figura 40:

Figura 40 - Modelo de um *perceptron* de uma rede neural.

Fonte: Mukherjee (2003)

Depois da soma, há a função de ativação da rede neural. A função de ativação mais simples tem como saída “um” quando a soma passa por um determinado valor ou “zero”. Segundo Mukherjee (2003) a função mais usada em redes neurais é a função sigmoide.

Para definir o vetor $\{W\}$ de pesos é preciso treinar o *perceptron* pela lei de treinamento do *perceptron* (Papilinski, 2005). O erro $\varepsilon(n)$ é definido pela diferença entre a saída $d(n)$ esperada e o $y(n)$ calculado. Os pesos são corrigidos seguindo a seguinte equação:

$$w(n+1) = w(n) + \eta \varepsilon(n) x(n) \quad (5.1)$$

Onde η é o ganho que controla taxa de aprendizado e precisa ser ajustado para garantir que o algoritmo convirja para o valor desejado. A cada interação o peso w é atualizado.

Esse método é adaptado para definir o vetor ótimo $\{W\}$ que minimiza o erro. Portanto o erro é calculado para cada peso do vetor e o objetivo é minimizar o erro médio quadrático dado pela equação 5.2.

$$J(w) = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \varepsilon^2(n) \quad (5.2)$$

O gradiente $\nabla J(w)$ de J em relação à w é calculado para achar um mínimo local ou global de $J(w)$. Esse mínimo é encontrado quando $\nabla J(w)=0$. Para tanto, caminha-se

na direção que $\nabla J(w)$ é negativo, o método do gradiente decrescente. Esse processo é mostrado na equação 5.3 e na figura 41.

$$\Delta w = -\eta \nabla J(w) \quad (5.3)$$

Figura 41 - Ilustração do método de gradiente decrescente.

Fonte: Paplinski (2005)

Se esse ponto não é atingido, é necessário um critério de parada. Segundo Paplinski (2005), há dois critérios de parada mais populares: quando o erro é pequeno o suficiente ou quando a variação entre interações é suficientemente pequena.

Para simular funções não lineares é usada uma camada interna antes da camada de saída. Segundo O’Gorman et al (2008) e Paplinski (2005), duas camadas (uma interna e uma de saída) são suficientes para aproximar qualquer função não linear desde que se tenham dados suficientes para o treinamento. A figura 42 mostra uma rede neural com uma camada interna:

Figura 42 - Rede neural com uma camada interna.

Fonte: Paplinski (2005)

Para treinar uma rede neural de multicamadas é necessário propagar o erro nas outras camadas (*backpropagation*) atualizando os pesos da camada interna. Portanto, os pesos de uma camada dependem dos valores da outra camada. Assim, é possível atualizar os pesos depois de cada dado de treinamento ou depois de todos os dados de treinamento forem usados (PAPLINSKI, 2005).

O número de nós em cada camada muda em cada caso. A rede neural usada por Chan, Lo e Shen (2000), por exemplo, possui uma camada interna com quatro nós. Segundo os autores esse modelo foi escolhido, pois apresentava uma melhor taxa de convergência e precisão. Sbarufatti et al (2017) explicam que um maior número de neurônios internos aumenta a capacidade e complexidade da rede neural, porém há o risco de sobre ajustamento (*overfitting*), o que diminui o aspecto genérico da rede neural.

Além da etapa de treinamento, há a etapa de testes. Por isso, os dados são separados aleatoriamente entre dados para treinamento e dados para testes, assim a rede neural pode ser validada. Portanto a análise usando uma rede neural pode ser útil para este projeto principalmente por causa da sua pequena demanda computacional. Além disso, um número alto de dados foi obtido. Em um primeiro momento será treinada uma rede neural para prever a capacidade de uma bateria ou o SOH de acordo com a resistência e a capacitância do modelo de Randle.

5.2. Lógica fuzzy

5.2.1. Base teórica da lógica fuzzy

Salkind et al (1999) explica que a lógica *fuzzy* possibilita a modelagem de sistemas não lineares sem a necessidade de um modelo matemático explícito. O exemplo clássico de lógica *fuzzy* usado em várias fontes (SALKIND et al, 1999; ZENATI; DESPREZ; RAZIK, 2010; SINGH; REISNER, 2002) é o da medição da temperatura de um quarto ou ambiente. É possível usar um valor concreto (*crisp*), como por exemplo, a temperatura de um ambiente medida por um termômetro, ou um valor incerto (*fuzzy*) para definir a temperatura usando uma expressão como, por exemplo, “quente” ou “frio”. Ou seja, os dados são classificados em categorias (*fuzzy subsets*), e o quanto cada dado pertence a cada categoria é medido por uma “função de pertencimento” (*membership function*). Segundo Lu et al (2013), a lógica *fuzzy* tenta simular o pensamento e tomadas de decisões dos seres humanos, algo próximo da intuição. Uma vantagem do método é a sua simplicidade apesar de necessitar conhecimento prévio das baterias.

De acordo com Zenati, Desprez e Razik (2010), as funções de pertencimento mais comuns são as funções trapezoidal, triangular, em formato de sino e gaussiana como é mostrado na figura 43:

Figura 43 - formas de funções de pertencimento: a) trapezoidal, b) triangular, c) formato de sino e d) guassiana,

Fonte: Zenati, Desprez e Razik (2010).

A figura 44 resume os diferentes processos de um sistema baseado em lógica fuzzy.

Figura 44 - Componentes de um sistema de lógica fuzzy,

Fonte: Zenati, Desprez e Razik (2010).

Fuzzificação (*Fuzzification*) é o processo de converter os dados analógicos (*Analog inputs*) em valores fuzzy usando funções de pertencimento pré-estabelecidas (ZENATI; DESPREZ; RAZIK, 2010). A segunda etapa consiste em definir o conjunto de regras (*Rule base*), que são baseadas no modelo “se x então y”. Essas regras serão usadas no mecanismo de inferência (*Inference Engine*), que consiste em um método para determinar a saída dependendo dos valores de entrada. Salkind et al (1999) e Zenati, Desprez e Razik (2010) usam o modelo de Sugeno. Esse modelo consiste em achar a saída z em função das entradas x e y seguindo uma equação da forma $z=ax+by+c$. A última etapa é a defuzzificação (*defuzzification*), que transforma a saída em dados concretos (*Analog Outputs*), pois eles estão em forma *fuzzy*.

5.2.2. Método de Sugeno de ordem 0 e 1

Foram feitos testes com três funções de pertencimento: triangular, gaussiana e sino. As funções de pertencimento escolhidas foram a função gaussiana para o método de Sugeno de ordem 0 e a função triangular para o método de Sugeno de ordem 1 pois foram as funções de pertencimento que apresentaram melhores resultados. Nas figuras 45 a 48 são apresentados a fuzzificação dos dados de resistência e capacitância:

Figura 45 - Funções de pertencimento triangulares para a análise da resistência.

Fonte: Autor

Figura 46 - Funções de pertencimento triangulares para a análise da capacitância.

Fonte: Autor

Figura 47 - Funções de pertencimento gaussianas para a análise da resistência.

Fonte: Autor

Figura 48 - Funções de pertencimento gaussianas para a análise da capacitância.

Fonte: Autor

Foram definidas 7 funções de pertencimento para cada dado de entrada: extremamente baixa, muito baixa, baixa, média, média alta, alta e muito alta.

Para cada conjunto {resistência, capacitância} criou-se uma regra “se x e y então z”. Assim foi obtido uma tabela de regras com 49 regras. Usou-se o modelo de Sugeno

de ordem 0 e de ordem 1 como foi descrito por Valle (2015). No modelo de ordem 0, calculou-se o SOH de cada dado de treino usando a formula da equação 5.4.

$$SOH = \frac{\sum_{i=1}^{49} w_i Q_i}{\sum_{i=1}^{49} w_i} \quad (5.4)$$

Onde w_i representa a ativação da regra i . Por exemplo, a ativação da regra entre as funções “extremamente baixa” da resistência e da capacitância é descrita pela formula 5.5.

$$w_1 = F_{extrem_baixa}(R) \wedge F_{extr_baixa}(C) \quad (5.5)$$

Onde $\wedge$ representa a função mínimo. Q_i é definido pela tabela de regras. No caso do modelo de Sugeno de ordem 0, Q_i é igual a uma constante.

As constantes Q_i da tabela de regras foram atualizadas para diminuir o erro quadrático médio entre o valor de SOH obtido e valor medido nos dados de treino. Essa tabela de regras foi em seguida utilizada para inferir o SOH dos dados de teste.

No modelo de Sugeno de ordem 1 o processo é parecido. A diferença é que o SOH é calculado com a fórmula 5.6.

$$SOH = \frac{\sum_{i=1}^k w_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (5.6)$$

Onde f_i é um polinômio de ordem 1 (equação 5.7).

$$f_1 = r_1 * R + c_1 * C + b_1 \quad (5.7)$$

Ou seja, são definidas 3 tabelas de regras para o modelo de Sugeno de ordem 1, uma tabela para cada valor de entrada (R e C) e uma tabela com constantes.

Os valores dessas tabelas de regras foram atualizados da mesma forma, ou seja, usando os dados de treino para obter o menor erro quadrático médio.

5.2.3. Exemplos de análise de baterias usando lógica fuzzy

Foram encontrados 4 artigos que usam lógica *fuzzy* em sistemas de análise de gestão de baterias. Singh e Reisner (2002, 2006) usam *fuzzy* para prever quantos pulsos a bateria de um desfibrilador aguenta. É uma previsão online do SOF da bateria com outra métrica. Salkind et al (1999) e Zenati, Desprez e Razik (2010) usam lógica *fuzzy* para prever o SOC e SOH de baterias.

5.3. *Adaptatividade*

5.3.1. Adaptatividade na literatura

O conceito de adaptatividade é um conceito amplo, por isso existe na literatura várias formas de definir esse conceito.

Santos (2016) define um dispositivo adaptativo como um dispositivo que “pode ser representado por um conjunto de regras expressas em qualquer formato e um conjunto de operações associado a cada uma das regras”. Com essa definição, a adaptatividade pode ser usada em diversas áreas basta que o algoritmo seja definido por um conjunto de regras. Assim as operações associadas a essas regras modificam as repostas do algoritmo.

Santos (2016) utiliza as formulações definidas por Neto (2001): o dispositivo adaptativo é composto por um dispositivo não adaptativo e um mecanismo adaptativo (NETO, 2001). Além disso para definir o dispositivo é preciso definir um conjunto de regras não adaptativas, um conjunto de regras adaptativas (tanto as regras usadas no estado k quanto as possíveis regras adaptativas), um conjunto de ações adaptativas e os mecanismos que relacionam uma ação adaptativa a uma regra adaptativa.

Canovas e Cugnasca (2016) retomam a ideia que um algoritmo adaptativo é composto por uma parte não adaptativa e dão o exemplo da Basic Adaptive Language (BADAL), uma linguagem de programação adaptativa onde a componente adaptativa é parte do código fonte, que pode ser alterado durante a execução do programa. Canovas e Cugnasca (2016) definem também o conceito de modelos adaptativos como “um modelo executável com capacidade de auto modificação ao longo de sua execução”, e dividem esse modelo adaptativo em duas partes: parte adaptativa (“elementos que expressam em que situações deve ocorrer adaptatividade”) e semântica adaptativa (“expressa quais são os efeitos decorrentes das ações adaptativas”).

Whittle et al (2009) definem sistemas adaptativos como sistemas com a “capacidade de maneira autônoma de modificar o seu comportamento” durante a execução. Segundo Whittle et al (2009), um dos principais desafios de sistemas adaptativos é lidar com a incerteza, tanto a incerteza que deriva das entradas quanto a incerteza que deriva dos requisitos, que poderiam mudar de caso a caso. Para tratar problemas

dessa ordem, os autores criaram uma linguagem que trata a incerteza dos requisitos da aplicação, modificando-os quando o ambiente muda.

Portanto, a adaptatividade é um conceito amplo que possui diferentes formulações e definições que dependem do problema que se deseja resolver. A criação de linguagens de programação adaptativas facilita a escolha dessas formulações, pois parte das formulações estão embutidas na criação da linguagem.

Porém a formulação escolhida em redes neurais adaptativas é um pouco diferente. Cichocki et al (1996) diminuem o tempo de convergência modificando a taxa de aprendizado de acordo com os dados de entradas. Diferente do que é feito em redes neurais não adaptativas onde é utilizada uma taxa de aprendizado fixa ou uma taxa de aprendizado que diminui com uma função pré-definida.

Amari e Cichocki (1998) fazem algo parecido ao usarem um algoritmo adaptativo para modificar o algoritmo de aprendizagem da rede neural em busca de maior eficiência estatística e menor tempo de convergência.

Lin e Lee (1991) apresentam uma solução parecida para um sistema híbrido entre rede neural e lógica *fuzzy*. O principal objetivo também é diminuir o tempo de convergência do algoritmo de aprendizado, o que é crítico principalmente para a inferência das regras do sistema de lógica *fuzzy* tradicional. Lin e Lee (1991) apresentam duas soluções híbridas e mostram que a adaptatividade do algoritmo de aprendizagem apresenta resultados melhores que o sistema tradicional.

Lin e Xu (2016) desenvolveram um sistema híbrido entre rede neural, lógica *fuzzy* e algoritmos genéticos. O sistema é dividido em dois componentes, um deles sendo a rede neural *fuzzy* que serve de entrada para o algoritmo genético. Um algoritmo adaptativo (*self-clustering algorithm* (SCA)) é utilizado para separar os dados em clusters. Esse algoritmo online se adapta aos valores de entrada.

O uso de adaptatividade em gerenciamento de baterias é diverso, muitas vezes usando outras terminologias. Hu et al (2015) descrevem o algoritmo usado por eles como “estimativa online”, onde o método de Relevance Vector Machine (RVM) é usado para estimar e a dependência da capacidade da bateria com algumas características.

Bai et al (2014) usam um algoritmo de “modelo livre” atualizando um modelo baseado em filtro de Kalman e redes neurais para se adaptar a novos dados obtidos da tensão da bateria e estimar o SOC e SOH.

Fleischer et al (2012) apresentam um algoritmo de “auto aprendizado” que combina diferentes algoritmos (redes neurais, lógica fuzzy e filtro de Kalman) para prever o SOF atual da bateria baseado no SOC, SOH e temperatura.

Lakkis et al (2015) desenvolvem um algoritmo com observador adaptativo não linear que se adapta tanto na carga quanto na descarga da bateria para estimar os níveis de SOC e SOH.

É possível concluir que a adaptatividade é usada em alguns momentos em redes neurais e outros algoritmos inspirados em sistemas biológicos para facilitar e simplificar o processo de aprendizado e diminuir o tempo de convergência. Em outros casos, a adaptatividade é usada em gerenciamento de baterias e inteligência artificial para melhorar os resultados do algoritmo para uma bateria específica, como é feito em outras áreas da adaptatividade.

5.3.2. Inserção de adaptatividade

Como foi dito antes, adaptatividade pode ser definida como um conjunto de regras modificáveis. Portanto foi inserida adaptatividade na rede neural depois da rede neural já ter os seus pesos definidos. Primeiramente, os dados de 20 baterias (1000 conjuntos de dados) foram usados para treinar e testar a rede neural, em seguida os 50 dados da bateria restante foram usados para testar o algoritmo adaptativo, mudando os pesos da rede neural (ou as regras de execução da rede neural) para que esta se adapte aos dados da última bateria, estimando com maior precisão a capacidade atual da bateria. Repetiu-se o processo 21 vezes, criando assim 21 redes neurais, uma para cada bateria, e o objetivo era atualizar esses dados de forma adaptativa e verificar que o erro médio fosse menor. Assim os resultados seriam mais confiáveis, pois não dependeriam da escolha da bateria.

Nesse processo, simulou-se a obtenção de dados que o dispositivo conectado à bateria conseguiria. Como a função da rede neural é prever a capacidade em um momento da bateria, e essa capacidade muda de tempo em tempo, o dispositivo terá que realizar diversas previsões. Assim, a vantagem de uma rede neural adaptativa é

que as previsões ficam mais precisas para cada dado recebido. É importante notar que essa técnica só é possível em caso onde a capacidade da bateria pode ser medida de outra maneira. Por exemplo, a corrente de descarga for conhecida, é possível calcular a capacidade da bateria com o tempo de descarga. Uma aplicação que essa técnica pode ser utilizada é na medição da qualidade de baterias de desfibriladores. Quando a bateria está nova, é conhecido o número de vezes que o desfibrilador pode ser usado com uma carga cheia. Assim, um modo de calcular o SOH dessa bateria é o número vezes que o aparelho foi usado. Obtém-se assim a evolução do SOH.

Portanto nesse estudo os dados possuem uma ordem definida e o objetivo será melhorar a previsão do próximo dado.

No final, o erro médio da rede neural adaptativa é comparado ao erro médio da rede neural inicial. O esperado era que a diferença entre o erro médio da rede neural inicial e o erro médio adaptativo fosse aumentando para cada dado. Porém esse aumento não é constante nem totalmente garantido.

Por isso, modificou-se o algoritmo adaptativo atualizando a rede somente quando a rede adaptativa tivesse um erro menor para o dado apresentado. Atualizou-se a rede neural com o algoritmo do gradiente decrescente, o mesmo usado para o treino da rede. A premissa é que os dados que obtiveram um erro maior na rede adaptativa são diferentes dos outros dados da bateria por razões aleatórias (temperatura ambiente, corrente de carga ou descarga, etc). Assim para obter um erro médio adaptativo menor, esse dado é ignorado na atualização da rede. Como lembram Fleischer et al (2012), o sobre ajustamento pode ser um problema para algoritmos adaptativos já que o ruído pode mudar o modelo mais que outros dados. Por isso, com um novo dado, o modelo adaptativo deve escolher se esse dado será usado ou não para atualizar o sistema. (FLEISCHER et al, 2012)

Além disso, o dispositivo pode escolher qual das duas redes (a adaptativa ou a inicial) ele utilizará para prever o próximo dado considerando qual tem um erro médio menor para os dados já adquiridos.

Sendo assim, a premissa é que os dados mudam um pouco de bateria para bateria e que os dados de uma dada bateria são mais próximos entre si. O algoritmo busca se aproveitar dessa particularidade para obter resultados mais precisos.

Esse algoritmo é simples de ser implementado em microcontroladores, os mesmos necessários para fazer as medições da resistência e capacitância interna das baterias. Esse método é parecido com o método de aprendizado de transferência (*transfer learning*) descrito por Torrey e Shavlik (2000).

5.4. Melhorando a previsão de EOL com redes neurais

Ao usar redes neurais ou outros métodos para prever o SOH, é possível estimar o EOL. Porém o objetivo principal do método não é estimar o EOL, portanto essa previsão não é sempre eficiente. Por exemplo, o método pode obter um erro pequeno na previsão e errar a previsão do EOL se o SOH real estiver muito próximo do EOL.

Por isso, se inspirando na técnica descrita por Matsumoto e Hernandez-del-Moral (2016), criou-se um método para melhorar a previsão do SOH e do EOL. Após a previsão do SOH com uma rede neural, utilizou-se uma segunda rede neural para prever se a bateria atingiu o EOL. As entradas dessa segunda rede neural são a resistência e a capacitância internas da bateria. Portanto as duas redes neurais podem obter resultados conflitantes.

Finalmente, criou-se uma terceira rede neural que trata somente os casos que tiveram esses resultados conflitantes. As entradas da rede neural são a resistência e capacitância internas, o SOH calculado pela primeira rede neural e o EOL calculado pela segunda rede neural. A saída da rede é um status. Esse status vale 0 se o SOH real é mais de 8% menor que o SOH calculado, vale 1 se o SOH é 8% maior que o SOH calculado ou vale 0,5 se o erro absoluto for menor que 8%.

O objetivo dessa última rede neural é descobrir os casos que possuem um erro muito discrepante da média e corrigi-lo. Como foi feito por Matsumoto e Hernandez-del-Moral (2016), o objetivo é corrigir as previsões que estão muito longe da média e assim melhorar o resultado da previsão final.

5.5. Comparação dos métodos

Le e Tang (2011) definem o SOH de uma bateria em função da resistência interna ou em função da sua capacitância interna. Para medir a eficácia dos diferentes métodos usados, os resultados obtidos foram comparados com um método linear.

Como foi dito anteriormente, a resistência interna e a capacitância variam devido a vários fatores, não somente o SOH. Assim analisou-se também a relação entre essas medidas e o SOH como é feito por Liu et al (2013).

A reta com o menor erro médio quadrático para essas duas variáveis é calculada. Essa é uma forma simples de estimar o SOH somente com a informação da resistência interna ou da capacitância interna.

Assim é possível quantificar a qualidade da análise por outros métodos comparando com uma análise mais simples de ser realizada. Essa análise estatística é feita com os mesmos dados.

5.6. Validação cruzada

Em todos os métodos foi utilizada a técnica de dez interações de validação cruzada (*ten fold cross validation*). Nessa técnica, divide-se o conjunto de dados em dez. Para cada interação, o sistema é treinado com nove décimos dos dados e os dados restantes servem como teste. O processo é repetido dez vezes, ou seja, sempre há um décimo dos dados que serve como conjunto de teste. No final são calculados o erro médio de cada conjunto de teste e o erro médio de todos os dados. A estimativa do processo com k interações de validação cruzada não é tendenciosa, pois os k conjuntos de dados são escolhidos aleatoriamente (KOHAVI, 1995).

6. Resultados

6.1. *Redes neurais*

Foi desenvolvido um programa para computador em linguagem C++ que treinasse e testasse a rede neural e algumas topologias foram testadas. O código desse software está no apêndice B. A topologia que obteve melhores resultados foi escolhida. A rede neural criada possui duas camadas escondidas, a primeira com 9 neurônios e a segunda com 5 neurônios. A topologia dessa rede pode ser vista na figura 49, que foi criada no software MBP (LOPES; RIBEIRO, 2011).

Figura 49 - Topologia da rede neural.

Fonte: Autor.

Todas as funções da rede neural são sigmóides. Os pesos finais obtidos estão indicados nos apêndices.

Foram obtidos os resultados descritos na tabela 4 para a rede neural.

Tabela 4 - Resultados da rede neural.

Erro médio do treino n 0	7,376
Erro médio do treino n 1	7,432
Erro médio do treino n 2	7,295
Erro médio do treino n 3	6,89
Erro médio do treino n 4	6,369
Erro médio do treino n 5	6,439
Erro médio do treino n 6	7,165
Erro médio do treino n 7	7,127
Erro médio do treino n 8	6,562
Erro médio do treino n 9	6,954
Erro médio de todos os dados	6,958

Fonte: Autor

Os valores dos erros estão em porcentagem do SOH. Percebeu-se que o erro é maior para os dados onde o SOH é menor, pois depois de certa capacidade a bateria fica muito instável. É possível visualizar isso na figura 50, onde se calculou o erro médio por faixa de SOH:

Figura 50 - Gráfico do erro médio da rede neural por faixa de valor de SOH.

Fonte: Autor

Para baterias com capacidade maior que 80% o erro é inferior a 5%. Essas baterias representam a maioria dos dados de teste. Para uma aplicação de baterias estacionárias esse dado pode ser útil, mas é importante que o sistema identifique

baterias que chegaram ao fim da vida (EOL). Portanto calculou-se o número de diagnósticos errados de EOL que o sistema teria. Considerou-se que toda bateria que tinha SOH menor que o EOL estava no fim da vida. Definiu-se que houve erro de EOL quando o sistema calculou um SOH com erro maior que 5% e o status correspondente do EOL estava errado. Isso foi feito para que erros pequenos de SOH próximos do EOL não gerassem erros de EOL. O número de erros de EOL para a rede neural é apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da rede neural.

Intervalo	Número de medidas	Erro médio treino	Número de erro EOL
20-30	17	31,676	3
30-40	36	19,230	1
40-50	56	12,424	1
50-60	60	9,542	3
60-70	100	9,018	15
70-80	190	7,251	59
80-90	317	4,990	55
>90	274	3,450	4
Total	1050	6,958	141

Fonte: Autor

6.2. *Lógica Fuzzy*

Um software foi criado para analisar com lógica fuzzy os dados. O código desse software está no apêndice C.

6.2.1. Resultados para o modelo de Sugeno de ordem 0

No modelo de Sugeno de ordem 0 usou-se funções de pertinência gaussianas tanto para a resistência quanto para a capacitância. A regra de ativação usada foi a função mínimo (equação 5.5). A tabela de regras obtida para o modelo de Sugeno de ordem 0 pode ser visto nos apêndices.

Os resultados da tabela 6 foram obtidos para o modelo de Sugeno de ordem 0:

Tabela 6 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 0.

Erro médio do treino n 0	7,397
Erro médio do treino n 1	7,388
Erro médio do treino n 2	7,189
Erro médio do treino n 3	6,906
Erro médio do treino n 4	6,966
Erro médio do treino n 5	6,392
Erro médio do treino n 6	7,144
Erro médio do treino n 7	7,6
Erro médio do treino n 8	6,691
Erro médio do treino n 9	6,871
Erro médio de todos os dados	7,053

Fonte: Autor

Como nos outros modelos, percebeu-se que o erro médio é maior quanto menor é o SOH, como é mostrado na figura 51:

Figura 51 - Gráfico do erro médio no modelo de Sugeno de ordem 0 por faixa de valor de SOH.

Fonte: Autor

Como nos outros modelos a análise do EOL foi realizada. No modelo de ordem 0 obteve-se os resultados da tabela 7.

Tabela 7 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 0.

Intervalo	Número de medidas	Erro médio treino	Número de erro EOL
20-30	17	30,489	3
30-40	36	22,150	1
40-50	56	13,360	1
50-60	60	8,761	3
60-70	100	9,256	16
70-80	190	7,595	61
80-90	317	4,881	59
>90	274	3,286	3
Total	1050	7,053	147

Fonte: Autor

É possível observar que a proporção de erro de EOL é pequena o suficiente para a aplicação já que a deterioração da bateria ocorreria em um longo período de tempo, portanto várias medidas poderiam ser realizadas e as medidas incorretas seriam excluídas. Além disso, as baterias com um maior erro estão com um SOH muito pequeno, então o sistema já teria identificado como EOL em uma medida anterior.

6.2.2. Resultados para o modelo de Sugeno de ordem 1

No modelo de Sugeno de ordem 1 usou-se funções de pertinência triangulares tanto para a resistência quanto para a capacitância. A regra de ativação usada foi a função mínimo (equação 5.5). As tabelas de regras obtidas para o modelo de Sugeno de ordem 1 são apresentadas nos apêndices.

Os resultados obtidos para o modelo de Sugeno de ordem 1 estão na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 1.

Erro médio do treino n 0	7,586
Erro médio do treino n 1	7,705
Erro médio do treino n 2	7,421
Erro médio do treino n 3	7,357
Erro médio do treino n 4	6,715
Erro médio do treino n 5	7,291
Erro médio do treino n 6	7,349
Erro médio do treino n 7	7,47
Erro médio do treino n 8	6,603
Erro médio do treino n 9	6,976
Erro médio de todos os dados	6,818

Fonte: Autor

Como no modelo anterior, o erro foi maior para SOH menores como é observado na figura 52.

Figura 52 - Gráfico do erro médio no modelo de Sugeno de ordem 1 por faixa de valor de SOH.

Fonte: Autor

É perceptível que o modelo de Sugeno de ordem 1 tem resultados parecidos com o de ordem 0 e que a proporção de erro de EOL continua pequena e suficiente para a aplicação como visto na tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do modelo de Sugeno de ordem 0.

Intervalo	Número de medidas	Erro médio treino	Número de erro EOL
20-30	17	27,695	2
30-40	36	21,483	1
40-50	56	13,098	1
50-60	60	8,4699	2
60-70	100	8,869	16
70-80	190	7,613	61
80-90	317	4,654	64
>90	274	3,154	3
Total	1050	6,818	150

Fonte: Autor

Apesar do modelo de Sugeno de ordem 1 ter um número maior de erros de EOL, o erro médio do SOH previsto é menor. Apesar disso, o método é mais complexo que o Sugeno de ordem 0. A escolha entre o método de ordem 0 e o método de ordem 1 depende da aplicação já que o método de ordem 1 precisa de mais memória e mais tempo para ser computado.

6.3. Método adaptativo

6.3.1. Primeira versão do algoritmo adaptativo

Em um primeiro passo, criou-se o algoritmo adaptativo que atualizava os pesos da rede neural treinada para cada dado obtido. O código desse software está no apêndice D. Na tabela 10 são apresentados os resultados dos erros médios de cada rede neural para os 50 dados de cada bateria.

Tabela 10 - Erros médios da rede inicial e da rede adaptativa.

Bateria	Erro médio para os 50 dados	Erro médio adaptativo para os 50 dados	Diminuição em %
1	6,224	5,62	9,704
2	1,837	1,855	-1,005
3	6,392	4,359	31,806
4	6,535	6,026	7,795
5	10,603	9,886	6,768
6	8,497	5,655	33,45
7	8,708	9,055	-3,826
8	5,991	5,672	5,328
9	8,808	5,347	39,293
10	6,734	6,472	3,886
11	3,163	3,277	-3,454
12	5,495	4,634	15,665
13	5,726	6,517	-12,137
14	7,32	6,324	13,607
15	8,901	5,275	40,737
16	8,281	6,002	27,526
17	10,599	12,751	-16,876
18	15,268	9,769	36,015
19	10,209	10,13	0,78
20	8,059	7,808	3,106
21	8,906	10,122	-12,011
Média	7,727	6,788	12,143

Fonte: Autor

É possível ver na tabela 10 que algumas redes adaptativas possuem resultados piores que a rede neural inicial. A rede da bateria 17, por exemplo, tem um aumento do erro médio da ordem de 16,9%. Entretanto a média de diminuição do erro é alta (12,14%) e mostra que com poucos dados já é possível especializar a rede neural para a determinada bateria.

Outros resultados importantes são as evoluções do erro médio da rede neural adaptativa em comparação com o erro médio da rede inicial. Essa análise permitiu modificar o algoritmo adaptativo para otimizá-lo.

Era esperado que a diminuição do erro médio seguisse uma curva parecida à curva da bateria 3, que pode ser vista na figura 53.

Figura 53 - Diminuição do erro médio da bateria 3 para cada dado novo.

Fonte: Autor

A curva é em sua maior parte crescente monótona, indicando que o erro médio diminuiu constantemente. Porém não é o que foi visto na maioria dos casos. Um caso que pode ilustrar isso é o da bateria 5, como é visto na figura 54.

Figura 54 - Diminuição do erro médio da bateria 5 para cada dado novo.

Fonte: Autor

Apesar do erro médio adaptativo sempre ser menor que o erro médio inicial, já que a curva sempre é positiva, a curva tem diversos pontos de inflexão. Ou seja, alguns

dados aumentam o erro médio adaptativo e são melhores tratados pela rede neural inicial. Assim, as últimas previsões não são as mais precisas do conjunto de dado. Claramente há espaço para otimizar esse algoritmo.

Outros exemplos que mostram um ponto para aperfeiçoar essa primeira versão do algoritmo são os das baterias 11 e 17 (as figuras 55 e 56 respectivamente).

Figura 55 - Diminuição do erro médio da bateria 11 para cada dado novo.

Fonte: Autor

Figura 56 - Diminuição do erro médio da bateria 17 para cada dado novo.

Fonte: Autor

Na bateria 17, o erro médio da rede adaptativa foi quase sempre maior que o erro médio da rede inicial, portanto a adaptatividade não melhorou o resultado e poderia ser evitado. Para a bateria 11, o caso ilustra melhor o problema desse algoritmo adaptativo inicial. O erro médio adaptativo foi em quase todo o teste menor que o erro da rede inicial, porém os últimos dados atrapalharam os resultados e poderiam ser excluídos.

Por isso modificou-se o algoritmo descrito anteriormente para aproveitar somente os dados que possuem melhor relação entre si.

6.3.2. Resultados da versão final do algoritmo adaptativo

Essa segunda versão do algoritmo não atualiza a rede neural adaptativa quando o novo dado diminuiu a diferença entre o erro médio da rede inicial com o erro médio da rede alternativa. Ou seja, toda vez que há uma queda na curva da diferença dos erros. O objetivo é que as curvas tenham uma forma mais parecida com a curva da bateria 3 da figura 53.

A tabela 11 apresenta os resultados dessa segunda versão do algoritmo e houve uma melhora em comparação com a primeira versão.

Tabela 11 - Erros médios da rede inicial e da segunda versão da rede adaptativa.

Bateria	Erro médio para os 50 dados	Erro médio adaptativo para os 50 dados	Diminuição em %
1	6,786	6,383	5,951
2	2,061	2,518	-18,152
3	6,222	4,318	30,6
4	6,455	5,925	8,213
5	10,646	8,249	22,519
6	8,875	5,665	36,166
7	8,267	8,816	-6,227
8	7,067	6,104	13,62
9	9,047	5,749	36,447
10	7,556	8,861	-14,721
11	2,676	2,797	-4,339
12	5,614	4,351	22,505
13	6,705	7,077	-5,252
14	7,543	6,909	8,4
15	8,886	4,429	50,16
16	7,441	5,492	26,192
17	10,243	11,565	-11,424
18	15,627	10,573	32,344
19	10,269	10,551	-2,668
20	8,263	8,295	-0,377
21	9,882	10,652	-7,23
Média	7,911	6,918	12,553

Fonte: Autor

A curva da bateria 3 na figura 57 continuou com forma parecida.

Figura 57 - Diminuição do erro médio da bateria 3 na segunda versão do algoritmo.

Fonte: Autor

Em algumas baterias a segunda versão do algoritmo obteve um resultado pior, como é o caso da bateria 3, porém na média o resultado é melhor.

Uma das baterias que obtiveram uma melhora considerável foi a bateria 5, como é possível visualizar comparando as figuras 58 e 59.

Figura 58 - Diminuição do erro médio da bateria 5 na primeira versão do algoritmo.

Fonte: Autor

Figura 59 - Diminuição do erro médio da bateria 5 na segunda versão do algoritmo.

Fonte: Autor

No exemplo da bateria 5 o objetivo da premissa foi atingido já que as quedas que ocorrem na curva na primeira versão do algoritmo ocorrem com menor intensidade na segunda versão, diminuindo os efeitos negativos de um dado que diverge do restante do conjunto de dados.

Nessa versão, é necessário calcular os resultados das duas redes neurais e algumas vezes a rede neural inicial obtém resultados melhores. Por isso, modificou-se o algoritmo uma última e terceira vez onde escolhe-se o resultado da rede neural (rede neural inicial ou rede neural adaptativa) que tem o menor erro médio no conjunto de dados já obtidos daquela bateria. Essa diferença é simples de projetar e evita que a previsão seja piorada.

Os resultados dessa versão final do algoritmo estão na tabela 12.

Tabela 12 - Erros médios da rede inicial e da rede adaptativa final.

Bateria	Erro médio para os 50 dados	Erro médio adaptativo para os 50 dados	Diminuição em %
1	6,786	6,383	5,951
2	2,061	2,119	-2,725
3	6,222	4,318	30,6
4	6,455	5,998	7,088
5	10,646	8,249	22,519
6	8,875	5,665	36,166
7	8,267	8,269	-0,022
8	7,067	6,104	13,62
9	9,047	5,749	36,447
10	7,556	7,761	-2,635
11	2,676	2,808	-4,708
12	5,614	4,39	21,807
13	6,705	6,845	-2,04
14	7,543	6,909	8,4
15	8,886	4,429	50,16
16	7,441	5,492	26,192
17	10,243	10,795	-5,107
18	15,627	10,934	30,035
19	10,269	10,643	-3,514
20	8,263	8,336	-0,868
21	9,882	10,013	-1,313
Média	7,911	6,772	14,401

Fonte: Autor

A tabela 12 mostra que a vantagem do algoritmo final em relação à segunda versão se dá nos conjuntos de dados onde a segunda versão do algoritmo é pior que a rede inicial. Para esses casos o erro diminuiu consideravelmente. Porém para os casos onde a segunda versão é melhor que a terceira (bateria 4 por exemplo), a diferença entre os duas é pequena.

É possível visualizar a vantagem do algoritmo adaptativo final no gráfico da bateria 10 (figura 60). Enquanto a segunda versão é melhor que a rede inicial, o algoritmo final não oferece vantagem, porém a partir da 34ª medida, ele evita que erro aumente.

Figura 60 - Comparação da diminuição do erro médio para o 2º e 3º algoritmo com a bateria 10.

Fonte: Autor

Em suma, o algoritmo adaptativo foi atualizado para reduzir o erro médio da previsão do próximo dado a ser coletado. A diminuição do erro médio obtida pelo algoritmo adaptativo final para os 21 conjuntos de dados foi de 14,4%. Esse algoritmo pode ser inserido no código do microcontrolador que controla a bateria.

6.4. Melhoria das previsões da rede neurais

Criou-se uma segunda rede neural para prever somente o EOL das baterias. Para essa rede neural, somente uma camada interna com 25 neurônios foi usada (figura 61). A figura 61 foi criada no software MBP (LOPES; RIBEIRO, 2011).

Figura 61 - Topologia da segunda rede neural para previsão do EOL.

Fonte: Autor.

Os pesos obtidos para essa rede neural podem ser vistos nos apêndices.

Como era de se esperar, o maior número de erros na previsão de EOL se encontra nas baterias que possuem um SOH próximo do valor de definição do EOL. Os resultados dessa rede são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da segunda rede neural.

Intervalo	Número de medidas	Erro EOL	Porcentagem
20-30	17	4	23,53
30-40	36	5	13,89
40-50	56	4	7,14
50-60	60	2	3,33
60-70	100	19	19
70-80	190	53	27,894
80-90	317	27	8,52
>90	274	1	0,36
Total	1050	115	10,95

Fonte: Autor

Além disso, o número de erros de EOL foi menor que o número previsto pela primeira rede neural. Isso também era esperado.

Finalmente, separou-se 80 casos que eram discrepantes para poder criar a terceira rede neural. Essa terceira rede neural possui duas camadas internas, uma com 10 neurônios e outra com 2 neurônios (figura 62). A figura 62 foi criada no software MBP (LOPES; RIBEIRO, 2011).

Figura 62 - Topologia da terceira rede neural.

Fonte: Autor

Os pesos obtidos para essa rede neural estão nos apêndices.

Quando a terceira rede neural indicava que o erro da previsão do SOH era maior que 8%, corrigiu-se o erro. Como a terceira rede neural não indica o quanto o SOH está incorreto, somente que ele está incorreto mais ou menos que 8%, foi preciso definir um fator de correção arbitrário. Esse valor foi determinado para obter o menor erro médio nesses 80 dados e um menor número de erro de EOL. Quando a rede indicava que o erro de SOH era 8% maior que o real, diminuiu-se o SOH em 9%. Quando a rede indicava que o erro de SOH era 8% menor que o real, aumentou-se o SOH em 16%. Os resultados desses 80 dados estão na tabela 14.

Tabela 14 - Comparando os resultados da primeira e terceira redes neurais.

	Resultados para a 1ª rede neural	Resultados após a 3ª rede neural
Média do SOH dos 80 dados	10,90	8,21
Desvio padrão dos 80 dados	8,69	7.88
Número de erro de EOL	53	34

Fonte: Autor

É possível observar uma melhora na previsão do SOH e do EOL.

6.5. Método linear

Criou-se um programa parecido ao programa com lógica fuzzy para definir 3 equações que relacionassem a resistência e a capacitância ao SOH. O código desse software está no apêndice E. Ou seja, definiu-se os coeficientes a , b , d , e , x , y e z que obtivessem o menor erro médio para as seguintes equações:

$$SOH = a * R + b \quad (6.1)$$

$$SOH = d * C + e \quad (6.2)$$

$$SOH = x * R + y * C + z \quad (6.3)$$

Os mesmos dados foram para comparar os outros métodos com esse método mais simples de ser obtido.

6.5.1. Resultados considerando somente a resistência

Nesse modelo obteve-se a equação de reta entre a resistência e o SOH com o menor erro médio. Os valores dos coeficientes são: $a = -24.175312$ e $b = 101.316772$

Os resultados são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Resultados do 1º modelo linear.

Erro médio do treino n 0	8,456
Erro médio do treino n 1	8,255
Erro médio do treino n 2	7,799
Erro médio do treino n 3	7,696
Erro médio do treino n 4	7,89
Erro médio do treino n 5	7,18
Erro médio do treino n 6	7,822
Erro médio do treino n 7	8,097
Erro médio do treino n 8	7,517
Erro médio do treino n 9	7,615
Erro médio de todos os dados	7,812

Fonte: Autor

Como nos modelos anteriores, o erro foi maior para SOH menores (figura 63):

Figura 63 - Gráfico do erro médio no 1º modelo linear por faixa de valor.

Fonte: Autor

A proporção de erros de EOL está na tabela 16.

Tabela 16 - Resultados do 1º modelo linear.

Intervalo	Número de medidas	Erro médio treino	Número de erro EOL
20-30	17	34,238	3
30-40	36	23,727	2
40-50	56	16,057	1
50-60	60	10,010	6
60-70	100	9,009	16
70-80	190	7,813	62
80-90	317	6,019	63
>90	274	3,553	2
Total	1050	7,812	155

Fonte: Autor

6.5.2. Resultados considerando somente a capacitância

Nesse modelo obteve-se a equação de reta entre a capacitância e o SOH com o menor erro médio. Os valores dos coeficientes são: $d = 1139.419189$ e $e = 67.582153$

Os resultados estão na tabela 17.

Tabela 17 - Resultados do 2º modelo linear.

Erro médio do treino n 0	11,999
Erro médio do treino n 1	12,489
Erro médio do treino n 2	10,641
Erro médio do treino n 3	12,652
Erro médio do treino n 4	12,435
Erro médio do treino n 5	11,39
Erro médio do treino n 6	12,409
Erro médio do treino n 7	11,705
Erro médio do treino n 8	12,997
Erro médio do treino n 9	12,861
Erro médio de todos os dados	12,157

Fonte: Autor

Como em todos os modelos, o erro foi maior para SOH menores:

Figura 64 - Gráfico do erro médio no 2º modelo linear por faixa de valor.

Fonte: Autor

A proporção de erros de EOL pode ser vista na tabela 18.

Tabela 18 - Resultados do 2º modelo linear.

Intervalo	Número de medidas	Erro médio treino	Número de erro EOL
20-30	17	46,811	8
30-40	36	37,332	16
40-50	56	28,134	15
50-60	60	16,715	24
60-70	100	8,080	40
70-80	190	4,440	84
80-90	317	10,684	74
>90	274	10,979	12
Total	1050	12,157	273

Fonte: Autor

6.5.3. Resultados considerando a resistência e a capacitância

Nesse modelo obteve-se a equação do plano entre a resistência e a capacitância e o SOH com o menor erro médio. Os valores dos coeficientes são: $x = -26.324219$, $y = -283.652344$ e $z = 105.864311$. Os resultados estão na tabela 19.

Tabela 19 - Resultados do 3º modelo linear.

Erro médio do treino n 0	8,169
Erro médio do treino n 1	8,011
Erro médio do treino n 2	7,758
Erro médio do treino n 3	7,491
Erro médio do treino n 4	7,514
Erro médio do treino n 5	7,056
Erro médio do treino n 6	7,608
Erro médio do treino n 7	8,031
Erro médio do treino n 8	7,297
Erro médio do treino n 9	7,545
Erro médio de todos os dados	7,625

Fonte: Autor

Como em todos os modelos, o erro foi maior para SOH menores (figura 65).

Figura 65 - Gráfico do erro médio no 3º modelo linear por faixa de valor.

Fonte: Autor

Esse é o melhor modelo linear. A proporção de erros de EOL está na tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do 3º modelo linear.

Intervalo	Número de medidas	Erro médio treino	Número de erro EOL
20-30	17	33,703	3
30-40	36	23,280	2
40-50	56	15,7696	2
50-60	60	10,510	7
60-70	100	9,575	19
70-80	190	7,567	62
80-90	317	5,193	53
>90	274	3,794	2
Total	1050	7,625	150

Fonte: Autor

Esse é método mais simples computacionalmente tanto para treinamento quanto para implementação e serve de parâmetro de comparação.

7. Análise dos resultados

A tabela 21 compara os resultados da rede neural, lógica fuzzy e do método linear:

Tabela 21 - Comparação dos resultados.

Método	Erro médio	Número de erro de EOL	Erro de EOL em %
Rede neural	6,958	141	13,43
Fuzzy ordem 0	7,053	147	14
Fuzzy ordem 1	6,818	150	14,29
Linear - resistência	7,812	155	14,76
Linear - capacitância	12,157	273	26
Linear - resistência e capacitância	7,625	150	14,29

Fonte: Autor

O método que apresentou os melhores resultados foi a rede neural já que obteve o segundo menor erro médio e o menor número de erros de previsão de EOL. O método utilizando lógica fuzzy ofereceu resultados melhores que os métodos lineares, o que justifica o seu uso já que é um método de implementação mais simples que a rede neural, pois o treinamento do sistema fuzzy é mais simples de ser feita e não necessita de um grande conjunto de dados. Adicionalmente, o método de lógica fuzzy de ordem 1 obteve o menor erro médio.

Quanto maior a complexidade do método, menor o erro médio. Isso é possível de ser visto já que o método usando lógica fuzzy de ordem 0 tem o maior erro seguido da lógica fuzzy de ordem 1 e finalmente a rede neural. Para analisar a complexidade do método deve se levar em conta tanto a complexidade do treinamento, a quantidade necessária de dados prévios já que isso envolve testes extensos e a complexidade da implementação do método no sistema embarcado que monitora a bateria estacionária.

Quando usados em microcontroladores atuais, essas técnicas não usam muito espaço de memória. A rede neural estudada, por exemplo, tem 83 parâmetros. Nesse aspecto, o método de Sugeno de ordem 1 da lógica fuzzy é o mais ineficiente já que usa 147 parâmetros. Isso poderia ser evitado diminuindo o número de funções de pertencimento, utilizando 3 ou 5 categorias em vez de 7. Isso diminuiria a complexidade do método e provavelmente não influenciaria tanto o resultado já que o método de Sugeno de ordem 0 teve um resultado parecido. Além disso, alguns parâmetros não são utilizados já que não há dados que possuem a característica definida e poderiam ser eliminados. Por exemplo, não há dado de bateria com

resistência na categoria “muito alta” e capacitância na categoria “muito alta”, ou seja, não há necessidade de definir um parâmetro para um caso como esse.

Além disso, é possível perceber que um erro médio menor na previsão do SOH não necessariamente significa um número menor de erro de previsão de EOL. Como o objetivo era minimizar o erro médio, os dados que estão longe da média apresentam erros maiores. Isso pode ser visualizado nos gráficos que separam o erro médio pela faixa de valor de SOH. Como foi obtido um maior número de medidas que não tinham atingido o EOL, esses valores possuem erro médio menor. O número de erro de definição de EOL é alto para todos os métodos pois há um número alto de dados que estão próximos do valor de definição. Isso pode ser contornada em soluções de baterias estacionárias com ênfase em aplicações de segurança já que essa aplicação permite diversas medições em um longo período de tempo. Portanto o registro da evolução dessa medição seria útil para corrigir discrepâncias relacionadas aos métodos.

O método de redução de erro de EOL é útil para reduzir essa distorção e é o método mais efetivo para obter o SOF da bateria. Esse seria o melhor método para avisar quando a bateria precisa ser trocada e pode ser usado em aplicações ligadas à segurança onde a bateria não é usada a maioria do tempo (a bateria do desfibrilador por exemplo). Esse método pode ser útil também em aplicações onde não é possível realizar muitos testes com a bateria. Outra utilidade desse método é otimizar a escolha do valor de EOL que é uma escolha crítica para aplicações de segurança.

Criou-se outro método para diminuir os erros da rede neural, o método adaptativo, que foca em diminuir o erro médio do conjunto de teste. Esse método tem objetivos diferentes e deve ser usado para casos diferentes. O método adaptativo só pode ser usado em casos que é possível calcular a capacidade da bateria de outra forma ou inferir ela de alguma forma. Esse método pode ser útil em baterias estacionárias que podem ser descarregadas de tempo em tempo, calculando assim a real capacidade da bateria. Para essas baterias o valor correto do SOH pode ser mais útil que o SOF.

Uma desvantagem presente nos métodos baseados em redes neurais é a necessidade de um conjunto de teste treinado e isso demanda tempo e custo. Uma forma de minimizar essa desvantagem é estabelecer uma comunicação com o microcontrolador para atualizar os parâmetros toda vez que novos dados são obtidos.

Para o método adaptativo isso pode ser benéfico pois o número de dados obtidos aumenta consideravelmente.

Outra desvantagem que a análise não levou em conta é a influência da temperatura e da corrente de descarga na estimativa do SOH. Essas variáveis influenciam e podem restringir o uso desses métodos em certas aplicações. Para medir a influência dessas variáveis seria necessário obter um número maior de dados de testes e aumentar a complexidade do circuito de medição. Essas variáveis podem ser analisadas em trabalhos futuros como também o embarque do sistema em uma aplicação específica. O método usando lógica fuzzy pode ser melhor em situações que possuem alta variedade de temperatura já que esse método não é tão dependente da base de dados e incluir mais uma variável ao sistema aumentaria o custo e a dificuldade na obtenção de dados.

No final, apresentou-se diversos métodos, cada um com suas vantagens. A vantagem dessa diversidade de métodos que usam inteligência artificial é a possibilidade de adaptar cada método a sua aplicação. Quanto mais complexo o método, melhor são os resultados, porém todos são possíveis de implementar usando um microcontrolador em um sistema embarcado.

8. Conclusão

Em suma, o objetivo foi atingindo já que os diversos métodos apresentados estimam a capacidade atual de uma bateria estacionária com dados coletados em um teste feito por um microcontrolador.

Como foi visto, novas soluções para monitoramento de baterias de íons de lítio são intensivamente estudadas já que esse tipo de bateria é cada vez mais útil para diversas aplicações. O mercado para esse tipo de bateria está crescendo a cada ano graças às diversas vantagens que esse tipo de bateria apresenta. Isso também justifica a busca por novas formas de gerenciar e monitorar essas baterias.

Nesse trabalho foram mostradas as diversas vantagens das baterias de íon de lítio e as suas características. Além disso as diferentes causas do envelhecimento dessas baterias foram descritas.

A teoria dos métodos de rede neural, lógica fuzzy e adaptatividade foi estudada e diversos métodos usando essas teorias foram apresentados e os resultados analisados. Esses métodos oferecem soluções simples e diferenciadas para a medição do SOH de baterias de íon de lítio.

Portanto a escolha do método a ser utilizado depende da aplicação e das limitações do projeto e do microcontrolador. Apesar de todos os métodos serem simples, alguns dependem de maior tratamento dos dados coletados (como por exemplo, a rede neural) e outros dependem de condições específicas da aplicação (como por exemplo, o método adaptativo).

REFERÊNCIAS

- AMARI, S.; CICHOCKI, A. Adaptive Blind Signal Processing – Neural Network Approaches, PROCEEDINGS OF THE IEEE, vol. 86, n. 10, 1998.
- APPLE. Disponível em: <https://support.apple.com/pt-br/HT208387>. Acesso em: 04 abr. 2019.
- ARMAND, M.; TARASCON, J.-M. Building better batteries, Nature, n. 451, 2008, p 652-657.
- ARORA, P.; WHITE, R.; DOYLE, M Capacity fade mechanisms and side reactions in lithium-ion batteries, Journal of the Electrochemical Society, n. 145.10, 1998, p 3647-3667.
- BAI, G. et al, A generic model-free approach for lithium-ion battery health management, Applied Energy, n. 135, 2014, p247-260.
- BRODD, R. J. Comments on the History of Lithium-Ion Batteries. Broddarp of Nevada, 2001. Disponível em: <https://www.electrochem.org/dl/ma/201/pdfs/0259.pdf> Acesso em: 02 dez. 2020.
- BUCHMANN, I. Battery University- Disponível em: <http://batteryuniversity.com/learn/>. Acesso em: 30 de jul. 2015.
- CANOVAS, S.R.M.; CUGNASCA, C.E. Um Mapeamento de Modelos Adaptativos para Dispositivos Adaptativos Guiados por Regras, X Workshop de Tecnologia Adaptativa, São Paulo, 2016.
- CHAN C.C.; LO E.W.C.; SHEN W. The available capacity computation model based on artificial neural network for lead–acid batteries in electric vehicles, Journal of Power Sources, n. 87, 2000, p 200-204.
- CHEN, C.; PECHT, M. Prognostics of lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods, Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference, Beijing, 2012, p. 1-6.
- CHEN, Z. et al. Online battery state of health estimation based on Genetic Algorithm for electric and hybrid vehicle applications, Journal of Power Sources, n. 240, 2013, p 184-192.

CHIANG, Y-H.; SEAN, W-Y.; KE J-C. Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles, *Journal of Power Sources*, n. 196, 2011, p 3921–3932.

CHOI, J. W.; AURBACH, D. Promise and Reality of Post-Lithium-Ion Batteries with High Energy Densities, *Nature Reviews Materials*, March 2016.

CICHOCKI, A. et al. Self-Adaptive Neural Networks For Blind Separation Of Sources, 1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Circuits and Systems Connecting the World. ISCAS 96, Atlanta, GA, USA, 1996, p. 157-160 vol.2.

COLEMAN, M.; HURLEY, W.G; LEE, C.K. An improved battery characterization method using a two-pulse load test, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, vol. 23, no. 2, p. 708-713.

DUBARRY, M. et al. State of health battery estimator enabling degradation diagnosis Model and algorithm description, *Journal of Power Sources*, n. 360, 2017, p 59–69.

FLEISCHER, C. et al, Self-learning state-of-available-power prediction for lithium-ion batteries in electrical vehicles, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, 2012, pp. 370-375.

GOLD PEAK INDUSTRIES LTD, Lithium Ion technical handbook, 2003. Disponível em <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/uang2/docs/li-handbook.pdf>. Acessado em 02 dez de 2020.

GROOT, J. State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods, Chalmers University Of Technology, 2012. Dissertação - CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden 2012

HE, W. et al. Prognostics of lithium-ion batteries based on Dempster–Shafer theory and the Bayesian Monte Carlo method, *Journal of Power Sources*, n. 196, 2011, p 10314– 10321.

HU, C. et al, Online estimation of lithium-ion battery capacity using sparse Bayesian learning, *Journal of Power Sources*, n. 289, 2015, p 105-113.

IDOTA, Y. et al. Tin-Based Amorphous Oxide: A High-Capacity Lithium-Ion–Storage Material, *Science*, n. 276, 1997, p 1395-1397.

JUANG, L. W. Online battery monitoring for state-of-charge and power capability prediction, 2010, 157p. Dissertação (Mestrado) - University of Wisconsin – Madison 2010.

KOHAVI, R. A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection, International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 1995.

LAKKIS, M.E. et al, Combined battery SOC/SOH estimation using a nonlinear adaptive observer, 14th annual European Control Conference, Linz, Austria, 2015.

LE, D.; TANG, X. Lithium-ion Battery State of Health Estimation Using Ah-V Characterization, Annual conference of the prognostics and health management society, 2011, vol. 73, no. 3, p. 367-373..

LIN, C.; LEE, C.S., Neural Network Based Fuzzy Logic Control And Decision System, IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS, 1991, vol. 40, n. 12, p. 1320-1336.

LIN, C.J.; XU, Y.L. A Self-Adaptive Neural Fuzzy Network With Group-Based Symbiotic Evolution And Its Prediction Applications, Fuzzy Sets and Systems, n. 157, 2016, p 1036 – 1056.

LINDEN; REDDY. Product Engineering Processes. Disponível em: <http://web.mit.edu/2.009/www/resources/mediaAndArticles/batteriesPrimer.pdf>.

Acesso em: 28 de jul. 2015.

LIU, D. et al. Satellite lithium-ion battery remaining cycle life prediction with novel indirect health indicator extraction, Energies, n. 6, 2013, p 3654-3668.

LOPES, N.; RIBEIRO, B. An evaluation of multiple feed-forward networks on GPUs, International Journal of Neural Systems (IJNS), n. 21, 2011, p 31-47.

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

MATSUMOTO, E.Y.; HERNANDEZ-DEL-MORAL, E. Improving regression predictions using individual point reliability estimates based on critical error scenarios, Information Sciences, n. 374, 2016, p 65–84.

MUKHERJEE, A. Advances in battery management using neural networks and fuzzy logic, School of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, Ithaca, 2013.

NETO, J.J. Adaptive rule-driven devices – general formulation and a case study, CIAA'2001 Sixth International Conference on Implementation and Application of Automata, Pretoria, South Africa, 2001, p 234–250.

O'GORMAN, C.C. et al. Artificial Neural Network Simulation of Battery Performance, Proceedings of the Thirty-First Hawaii International Conference on System Sciences, 1998, vol. 5, pp. 115-121.

PAPLINSKI, A.P. Neuro-Fuzzy Computing, 2005.

PASSERINI, S.; SCROSATI B. Lithium and Lithium-Ion Batteries: Challenges and Prospects. Electrochemical Society Interface. 2016 Jan, p 85-87.

REMMLINGERA, J. et al. State-of-health monitoring of lithium-ion batteries in electric vehicles by on-board internal resistance estimation, Journal of Power Sources, n. 196, 2011, p 5357–5363.

SAHA, B. et al. An integrated approach to battery health monitoring using bayesian regression and state estimation, IEEE Autotestcon 2007 Sep 17 p. 646-653.

SAHA, B.; GOEBEL, K.; CHRISTOPHERSEN, J. Comparison of Prognostic Algorithms for Estimating Remaining Useful Life of Batteries, Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2009 Jun, p.293-308.

SALKIND, A.J. et al. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology, Journal of Power Sources, n. 80, 1999, p 293–300.

SANTOS, J.M.N. Dispositivos Adaptativos Cooperantes, X Workshop de Tecnologia Adaptativa, São Paulo, 2016.

SBARUFATTI, C. et al. Adaptive prognosis of lithium-ion batteries based on the combination of particle filters and radial basis function neural networks, Journal of Power Sources, n. 344, 2017, p 128–140.

SCORSATI, B.; CROCE, F.; PANERO, S. Progress in lithium polymer battery R&D, Journal of Power Sources, n. 100, 2001, p 93-100.

SINGH, P.; REISNER, R. Fuzzy Logic-Based State-of-Health Determination of Lead Acid Batteries, 24th Annual International Telecommunications Energy Conference 2002 Oct p. 583-590.

SINGH, P. et al Design and implementation of a fuzzy logic-based state-of-charge meter for Li-ion batteries used in portable defibrillators, Journal of power sources, 2006.

SUOZZO, C. Lead-acid battery aging and state of health diagnosis, Tese (doutorado), The Ohio State University, 2008

TAIYOU RESEARCH. Global Market for Lithium-Ion Batteries - Forecast, Trends and Opportunities 2014-2020, 2013

THE ECONOMIST. In search of the perfect battery 2008- Disponível em: http://www.economist.com/sciencetechnology/tq/PrinterFriendly.cfm?story_id=10789409. Acesso em: 28 jul. 2015.

TORREY, L.; SHAVLIK, J. (2009). Transfer learning. Handbook of Research on Machine Learning Applications, IGI Global, 2009.

VALLE, M.E. O Método de Inferência de Takagi-Sugeno para Sistemas Baseados em Regras Fuzzy, Unicamp, 2015.

WANG, Y. et al. Probability based remaining capacity estimation using data-driven and neural network model, Journal of Power Sources, n. 315, 2016, p 199-208.

WHITTLE, J. et al. RELAX: Incorporating Uncertainty into the Specification of Self-Adaptive Systems, 17th IEEE International Requirements Engineering Conference 2009 Aug 31 p. 79-88.

WU. J.; ZHANG, C.; CHEN, Z. An online method for lithium-ion battery remaining useful life estimation using importance sampling and neural networks, Applied Energy, n. 173, 2016, p 134–140.

XING, Y. et al. Battery management systems in electric and hybrid vehicles, Energies, n. 4, 2011, p 1840-1857.

YANGA, D. et al. A neural network based state-of-health estimation of lithium-ion battery in electric vehicles, Energy Procedia, n. 105, 2017, p 2059–2064.

ZENATI, A.; DESPREZ, P.; RAZIK, H. Estimation of the SOC and the SOH of li-ion batteries, by combining impedance measurements with the fuzzy logic inference, IECON, Glendale, United States, Nov 2010, p.1767-1772.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Funções do FW de aquisição de dados.**➤ Função de carga**

```

if( BatTest == 3 ) //Bateria em carga
{
    v = BatteryCharge();// definição do PWM de carga e retorna a tensão da bateria.
    // Bateria é medida no primeiro ciclo do PWM, nos demais ciclos retorna FFFF
    //Ou seja, retorna o valor da bateria a cada 0.1segundos
    if( v != 0xffff )
    {
        t = TickCount % 300; // 1 log a cada 30 segundos (medição de ADC a cada 0.1s)
        TickCount++;
        vmed=vmed+v;
        vmedcount++;
        // v = ( v * 1611 + 2048 )/ 4096 + 49;
        // Registrar tensão do carregador da bateria
        // Divisor de tensão 47kOhms + 12kOhms
        v1 = ADRead( 1 << 6 ); // AD0.6 Charger out
        if(t==0&&vmed!=0)
        {
            v=vmed/vmedcount;
            vmed=0;
            vmedcount=0;
            LogWrite( v >> 8, v & 0xFF, v1 >> 8, v1 & 0xFF, 0x01 ); // Registrar medição da bateria
            LogCount++;
            v = ( v * 3291*48)/ 4095/330 + 46; // tensao em centivolts
            if(v>418) // Tensão que para de carregar
            BatTest=4;
            v = ( v + 5 ) / 10; // tensao em decivolts
            v = ( ( v / 10 ) << 4 ) +          // Algarismo das dezenas
            ( v % 10 );          // Algarismo das unidades
            Display7Seg( v, 3 ); //coloca no display a tensao
        }
    } // if v
} // if BatTest

```

➤ **Função de descarga nos primeiros 400ms**

```

switch( BatTest )
{
case 4:
CLR_IO( 1, 5 ); // P1.5 Load Battery – Desliga carregador da bateria
j1++;
if(j1>100) //Espera 2 segundos
{
BatTest=5;
j1=0;
v = ADRead( 1 << 3 ); // AD0.3 Bat
LogWrite( v >> 8, v & 0xFF, 0x00, 0x00, 0x03 ); // Registrar medição da bateria
LogCount++;
}
break;
case 5: // inicia a descarga e faz a primeira medição após
SET_IO( 1, 15 ); // Aciona o primeiro transistor de controle da descarga
SET_IO( 1, 6 ); // Aciona o segundo transistor de controle da descarga
BatTest=6;
v = ADRead( 1 << 3 ); // AD0.3 Bat
LogWrite( v >> 8, v & 0xFF, 0x00, 0x00, 0x03 ); // Registrar medição da bateria
LogCount++;
break;
case 6: //medição a cada 20ms até o final
v = ADRead( 1 << 3 ); // AD0.3 Bat
LogWrite( v >> 8, v & 0xFF, 0x00, 0x00, 0x03 ); // Registrar medição da bateria
LogCount++;
j1++;
if(j1>17)
{
BatTest=2; //regime de descarga normal
j1=0;
}
break;
} //fim do switch

```

➤ Função de descarga

```

if( BatTest == 2)// função de descarga
{
v = BatteryCheck(); // Mede tensão da bateria e controla o PWM de acordo devolve a
tensão da bateria a cada 250ms ou devolve 0xffff
if(v!=0xffff)
{
t = TickCount % 120; // 1 log a cada 30 segundos
TickCount++;
if( t == 0 )
{
LogWrite( v >> 8, v & 0xFF, 0x00, 0x00, 0x02 ); // Registrar medição da bateria
LogCount++;
}
v = ( v * 3291*48)/ 4095/330 + 46; // tensao em centivolts
if( ( v <= 300 ) || ( LogCount > 2047 ) ) //tensão menor que 3V ou log cheio
{
BatTest=0;// Estado final do teste
}
v = ( v + 5 ) / 10; // tensao em decivolts
v = ( ( v / 10 ) << 4 ) + // Algarismo das dezenas
( v % 10 ); // Algarismo das unidades
Display7Seg( v, 2 );
} //v!=0xffff;
} // if BatTest == 2

```

APÊNDICE B - Extratos do SW criado para análise com rede neural

```

/*
Loop de treinamento da rede neural
Define os pesos da rede
*/
for( epoch = 0 ; epoch < max_epoch ; epoch++) /* treina por n epocas */
{
    Error = 0.0 ;
    ck2=cmax/kfold;
    for( p = 1 ; p <= NUMDADOSfunc ; p++ ) { /* passar por todos dados de treino */
        if(p<t*ck2 | p>=(t+1)*ck2)
        {
            for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) { /* primeira camada escondida */
                SomaH[p][j] = Pesos1[0][j] ;
                for( i = 1 ; i <= NUMENTfunc ; i++ ) {
                    SomaH[p][j] += Input[p][i] * Pesos1[i][j] ;
                }
                Escond[p][j] = 1.0/(1.0 + exp(-SomaH[p][j])) ; /* Saida da sigmoide */
            }
            for( k = 1 ; k <= NUM2aLAYERfunc ; k++ ) { /* segunda camada escondida */
                Soma2H[p][k] = Pesos2[0][k] ;
                for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
                    Soma2H[p][k] += Escond[p][j] * Pesos2[j][k] ;
                }
                Escond2[p][k] = 1.0/(1.0 + exp(-Soma2H[p][k])) ; /* Saida da sigmoide */
            }
            for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k++ ) { /* Camada de saida e erro */
                SomaO[p][k] = Pesos1S[0][k] ;
                for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
                    SomaO[p][k] += Escond2[p][j] * Pesos1S[j][k] ;
                }
                Output[p][k] = 1.0/(1.0 + exp(-SomaO[p][k])) ; /* Saida da sigmoide */
                Error += 0.5 * (SAIDA[p][k] - Output[p][k]) * (SAIDA[p][k] - Output[p][k]) ; /* SSE */
                DeltaO[k] = (SAIDA[p][k] - Output[p][k]) * Output[p][k] * (1.0 - Output[p][k]) ;
            }
            for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) { /* back propagation para as camadas escondidas */
                SomaDeltaO[j] = 0.0 ;
                for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k++ ) {
                    SomaDeltaO[j] += Pesos1S[j][k] * DeltaO[k] ;
                }
                DeltaH2[j] = SomaDeltaO[j] * Escond2[p][j] * (1.0 - Escond2[p][j]) ;
            }
            for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) { /* back propagation para as camadas escondidas */
                SomaDelta2a[j] = 0.0 ;
                for( k = 1 ; k <= NUM2aLAYERfunc ; k++ ) {
                    SomaDelta2a[j] += Pesos2[j][k] * DeltaH2[k] ;
                }
                DeltaH[j] = SomaDelta2a[j] * Escond[p][j] * (1.0 - Escond[p][j]) ;
            }
            for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) { /* Pesos1 */
                DeltaPesos1[0][j] = eta * DeltaH[j] + alpha * DeltaPesos1[0][j] ;
                Pesos1[0][j] += DeltaPesos1[0][j] ;
                for( i = 1 ; i <= NUMENTfunc ; i++ ) {
                    DeltaPesos1[i][j] = eta * Input[p][i] * DeltaH[j] + alpha * DeltaPesos1[i][j] ;
                    Pesos1[i][j] += DeltaPesos1[i][j] ;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
}
for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) { /* PesosI2 */
    DeltaPesosI2[0][j] = eta * DeltaH2[j] + alpha * DeltaPesosI2[0][j] ;
    PesosI2[0][j] += DeltaPesosI2[0][j] ;
    for( i = 1 ; i <= NUM1aLAYERfunc ; i++ ) {
        DeltaPesosI2[i][j] = eta * Escond[p][i] * DeltaH2[j] + alpha * DeltaPesosI2[i][j];
        PesosI2[i][j] += DeltaPesosI2[i][j] ;
    }
}
for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k ++ ) { /* Pesos1S */
    DeltaPesos1S[0][k] = eta * DeltaO[k] + alpha * DeltaPesos1S[0][k] ;
    Pesos1S[0][k] += DeltaPesos1S[0][k] ;
    for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
        DeltaPesos1S[j][k] = eta * Escond2[p][j] * DeltaO[k] + alpha *
DeltaPesos1S[j][k] ;
        Pesos1S[j][k] += DeltaPesos1S[j][k] ;
    }
}
}
}
if( Error < 0.0004 ) break ; /* Para ao chegar proximo */
}

```


APÊNDICE C - Extratos do SW criado para análise com lógica fuzzy

➤ Função de pertinência triangular

```

/*
Função de pertinencia triangulo
recebe R de entrada, e os valores de inicio, pico e fim da função
retorna o peso segundo a função
se ini=pico, trapezio até 0.
se pico=fim, trapezio até infinito.
*/
float funcao_triangu(float R, float ini, float pico, float fim)
{
    float Rout=0;
    if(ini==pico)
    {
        if(R>fim)
            Rout=0;
        else if(R<=pico)
            Rout=1;
        else
            Rout=R*(1/(pico-fim))-(fim/(pico-fim));
    }
    else if(fim==pico)
    {
        if(R<ini)
            Rout=0;
        else if(R<=pico)
            Rout=R*(1/(pico-ini))-(ini/(pico-ini));
        else
            Rout=1;
    }
    else if(R<ini)
        Rout=0;
    else if(R>fim)
        Rout=0;
    else if(R<=pico)
        Rout=(R/(pico-ini))-(ini/(pico-ini));
    else
        Rout=(R/(pico-fim))-(fim/(pico-fim));
    return Rout;
}

```

➤ Função de pertinência gaussiana

```

/*
Função de pertinencia gaussiana
recebe R de entrada, e os valores de inicio, pico e fim da função
retorna o peso segundo a função gaussiana
*/
float funcao_gauss(float R, float ini, float pico, float fim)
{
    float Rout=0;
    Rout=(R-pico)/(fim-ini);
    Rout=-4*Rout*Rout;
    Rout=exp(Rout);
    return Rout;
}

```

```
}
```

➤ Cálculo das funções de pertinência

```
// lê a resistencia, a capacitancia e o SOH de cada dado e calcula todas as funções de pertinencia
while(c<cmax)
{
    fscanf(pfile, "%f %f %f", &fjR[c], &fjC[c], &fjSOH[c]);

    fjR_extbaix[c]=funcao_triang(fjR[c], 0.0, 0.25, 0.5);
    fjR_muitbaix[c]=funcao_triang(fjR[c], 0.25, 0.5, 0.75);
    fjR_baix[c]=funcao_triang(fjR[c], 0.5, 0.75, 1);
    fjR_media[c]=funcao_triang(fjR[c], 0.75, 1, 1.5);
    fjR_medialt[c]=funcao_triang(fjR[c], 1, 1.5, 2);
    fjR_alta[c]=funcao_triang(fjR[c], 1.5, 2, 2.5);
    fjR_muitoalta[c]=funcao_triang(fjR[c], 2, 2.5, 3);

    fjC_extbaix[c]=funcao_gauss(fjC[c], 0.0, 0.0025, 0.005);
    fjC_muitbaix[c]=funcao_gauss(fjC[c], 0.0025, 0.005, 0.0075);
    fjC_baix[c]=funcao_gauss(fjC[c], 0.005, 0.0075, 0.01);
    fjC_media[c]=funcao_gauss(fjC[c], 0.0075, 0.01, 0.015);
    fjC_medialt[c]=funcao_gauss(fjC[c], 0.01, 0.015, 0.02);
    fjC_alta[c]=funcao_gauss(fjC[c], 0.015, 0.02, 0.025);
    fjC_muitoalta[c]=funcao_gauss(fjC[c], 0.02, 0.025, 0.03);

    if(fjR[c]>2.5)
        fjR_muitoalta[c]=1.0;
    if(fjC[c]>0.025)
        fjC_muitoalta[c]=1.0;

    //printf("%f %f %f %f %f %f %f %f\n", fjR[c], fjR_extbaix[c], fjR_muitbaix[c], fjR_baix[c], fjR_media[c],
    fjR_medialt[c], fjR_alta[c], fjR_muitoalta[c]);
    c++;
}
```

➤ Cálculo do SOH estimado para o Sugeno de ordem 0

```
//calcula da previsão segundo a tabela de regras atual
while(c<cmax)
{
    fjres[c]=minimo(fjR_extbaix[c],fjC_extbaix[c])*ftabela[0];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_muitbaix[c])*ftabela[3];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_baix[c])*ftabela[1];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_media[c])*ftabela[2];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_medialt[c])*ftabela[6];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_alta[c])*ftabela[5];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_muitoalta[c])*ftabela[4];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_extbaix[c])*ftabela[8];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_muitbaix[c])*ftabela[9];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_baix[c])*ftabela[10];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_media[c])*ftabela[11];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_medialt[c])*ftabela[16];
    fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_alta[c])*ftabela[12];
```

```

fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_muitoalta[c])*ftabela[17];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_baix[c],fjC_extbaix[c])*ftabela[18];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_baix[c],fjC_muitbaix[c])*ftabela[13];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_baix[c],fjC_baix[c])*ftabela[14];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_baix[c],fjC_media[c])*ftabela[7];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_baix[c],fjC_medialt[c])*ftabela[19];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_baix[c],fjC_alta[c])*ftabela[15];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_baix[c],fjC_muitoalta[c])*ftabela[22];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_media[c],fjC_extbaix[c])*ftabela[21];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_media[c],fjC_muitbaix[c])*ftabela[20];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_media[c],fjC_baix[c])*ftabela[23];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_media[c],fjC_media[c])*ftabela[26];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_media[c],fjC_medialt[c])*ftabela[27];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_media[c],fjC_alta[c])*ftabela[25];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_media[c],fjC_muitoalta[c])*ftabela[24];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_medialt[c],fjC_extbaix[c])*ftabela[28];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_medialt[c],fjC_muitbaix[c])*ftabela[29];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_medialt[c],fjC_baix[c])*ftabela[30];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_medialt[c],fjC_media[c])*ftabela[33];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_medialt[c],fjC_medialt[c])*ftabela[31];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_medialt[c],fjC_alta[c])*ftabela[32];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_medialt[c],fjC_muitoalta[c])*ftabela[34];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_alta[c],fjC_extbaix[c])*ftabela[35];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_alta[c],fjC_muitbaix[c])*ftabela[36];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_alta[c],fjC_baix[c])*ftabela[37];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_alta[c],fjC_media[c])*ftabela[38];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_alta[c],fjC_medialt[c])*ftabela[39];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_alta[c],fjC_alta[c])*ftabela[40];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_alta[c],fjC_muitoalta[c])*ftabela[41];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_extbaix[c])*ftabela[42];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_muitbaix[c])*ftabela[43];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_baix[c])*ftabela[44];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_media[c])*ftabela[45];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_medialt[c])*ftabela[46];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_alta[c])*ftabela[47];
fjres[c]=fjres[c]+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_muitoalta[c])*ftabela[48];

```

```

soma=minimo(fjR_extbaix[c],fjC_extbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_muitbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_baix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_media[c]);
soma=soma+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_medialt[c]);
soma=soma+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_alta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_extbaix[c],fjC_muitoalta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_extbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_muitbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_baix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_media[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_medialt[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_alta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitbaix[c],fjC_muitoalta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_baix[c],fjC_extbaix[c]);

```

```

soma=soma+minimo(fjR_baix[c],fjC_muitbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_baix[c],fjC_baix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_baix[c],fjC_media[c]);
soma=soma+minimo(fjR_baix[c],fjC_medialt[c]);
soma=soma+minimo(fjR_baix[c],fjC_alta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_baix[c],fjC_muitoalta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_media[c],fjC_extbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_media[c],fjC_muitbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_media[c],fjC_baix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_media[c],fjC_media[c]);
soma=soma+minimo(fjR_media[c],fjC_medialt[c]);
soma=soma+minimo(fjR_media[c],fjC_alta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_media[c],fjC_muitoalta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_medialt[c],fjC_extbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_medialt[c],fjC_muitbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_medialt[c],fjC_baix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_medialt[c],fjC_media[c]);
soma=soma+minimo(fjR_medialt[c],fjC_medialt[c]);
soma=soma+minimo(fjR_medialt[c],fjC_alta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_medialt[c],fjC_muitoalta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_alta[c],fjC_extbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_alta[c],fjC_muitbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_alta[c],fjC_baix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_alta[c],fjC_media[c]);
soma=soma+minimo(fjR_alta[c],fjC_medialt[c]);
soma=soma+minimo(fjR_alta[c],fjC_alta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_alta[c],fjC_muitoalta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_extbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_muitbaix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_baix[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_media[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_medialt[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_alta[c]);
soma=soma+minimo(fjR_muitoalta[c],fjC_muitoalta[c]);
fjres[c]=fjres[c]/soma;
fjferro[c]=fjSOH[c]-fjres[c];
c++;

```

```

}

```

APÊNDICE D - Extratos do SW criado para análise com algoritmo adaptativo.

```

/*
Versão final do algoritmo adaptativo
Atualiza os pesos de acordo com os 50 dados quando for vantajoso
*/
for( p = 1 ; p <= 50 ; p++ ) { /* primeiro calcula o resultado com os pesos atuais */
    for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
        SomaHadap[p][j] = Pesos1adap[0][j] ;
        for( i = 1 ; i <= NUMENTfunc ; i++ ) {
            SomaHadap[p][j] += Inputadap[p][i] * Pesos1adap[i][j] ;
        }
        Escondadap[p][j] = 1.0/(1.0 + exp(-SomaHadap[p][j])) ;
    }
    for( k = 1 ; k <= NUM2aLAYERfunc ; k++ ) {
        Soma2Hadap[p][k] = Pesos2adap[0][k] ;
        for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
            Soma2Hadap[p][k] += Escondadap[p][j] * Pesos2adap[j][k] ;
        }
        Escond2adap[p][k] = 1.0/(1.0 + exp(-Soma2Hadap[p][k])) ;
    }
    for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k++ ) {
        SomaOadap[p][k] = Pesos1Sadap[0][k] ;
        for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
            SomaOadap[p][k] += Escond2adap[p][j] * Pesos1Sadap[j][k] ;
        }
        Outputadap0[p][k] = 1.0/(1.0 + exp(-SomaOadap[p][k])) ;
        if((SAIDAadap[p][k] - Outputadap0[p][k])<0)
            Erroradap += -(SAIDAadap[p][k] - Outputadap0[p][k])*100 ;
        else
            Erroradap += (SAIDAadap[p][k] - Outputadap0[p][k])*100 ;
        Erro_rede_bat[p]=Erroradap;
    }
}
Erro_rede_bat[0]=0.0; /*calcula o erro médio da rede*/
Erro_rede_adap[0]=0.0;
for( p = 1 ; p <= 50 ; p++ ) {
    Erro_rede_bat[p]=Erro_rede_bat[p-1]*(p-1)+Erro_rede_bat[p];
    Erro_rede_bat[p]=Erro_rede_bat[p]/p; //Evolução do erro médio
}

/*
Cria o vetor de pesos adaptativos
*/
for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
    i=0;
    Pesos1_adap_s[0][j]=Pesos1adap[0][j];
    for( i = 1 ; i <= NUMENTfunc ; i++ ) {
        Pesos1_adap_s[i][j]=Pesos1adap[i][j];
    }
}
for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
    i=0;
    Pesos2_adap_s[0][j]=Pesos2adap[0][j];
    for( i = 1 ; i <= NUM1aLAYERfunc ; i++ ) {
        Pesos2_adap_s[i][j]=Pesos2adap[i][j];
    }
}

```

```

    }
}
for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k ++ ) {
    j=0;
    Pesos1S_adap_s[0][k]=Pesos1Sadap[0][k];
    for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
        Pesos1S_adap_s[j][k]=Pesos1Sadap[j][k];
    }
}
/*
Mudança do vetor de pesos de acordo com o algoritmo
*/
for( p = 1 ; p <= 50 ; p++ ) {          //mudança ocorre para cada dado novo
//Primeiro, a saída com os novos pesos é calculada
    for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
        SomaHadap[p][j] = Pesos1adap[0][j] ;
        for( i = 1 ; i <= NUMENTfunc ; i++ ) {
            SomaHadap[p][j] += Inputadap[p][i] * Pesos1adap[i][j] ;
        }
        Escondadap[p][j] = 1.0/(1.0 + exp(-SomaHadap[p][j])) ;
    }
    for( k = 1 ; k <= NUM2aLAYERfunc ; k++ ) {
        Soma2Hadap[p][k] = Pesos2adap[0][k] ;
        for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
            Soma2Hadap[p][k] += Escondadap[p][j] * Pesos2adap[j][k] ;
        }
        Escond2adap[p][k] = 1.0/(1.0 + exp(-Soma2Hadap[p][k])) ;
    }
    for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k++ ) {
        SomaOadap[p][k] = Pesos1Sadap[0][k] ;
        for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
            SomaOadap[p][k] += Escond2adap[p][j] * Pesos1Sadap[j][k] ;
        }
        Outputadap[p][k] = 1.0/(1.0 + exp(-SomaOadap[p][k])) ;
        if((SAIDAadap[p][k] - Outputadap[p][k])<0)
            Erroradap_novo += -(SAIDAadap[p][k] - Outputadap0[p][k])*100 ;
        else
            Erroradap_novo += (SAIDAadap[p][k] - Outputadap0[p][k])*100 ;
        Erro_rede_adap[p]=Erroradap_novo;
        Error += 0.5 * (SAIDAadap[p][k] - Outputadap[p][k]) * (SAIDAadap[p][k] - Outputadap[p][k]) ;
        DeltaOadap[k] = (SAIDAadap[p][k] - Outputadap[p][k]) * Outputadap[p][k] * (1.0 -
Outputadap[p][k]) ;
    }
}
//Calcula-se os possiveis novos pesos depois do dado p
    for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
        SomaDeltaOadap[j] = 0.0 ;
        for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k++ ) {
            SomaDeltaOadap[j] += Pesos1Sadap[j][k] * DeltaOadap[k] ;
        }
        DeltaH2adap[j] = SomaDeltaOadap[j] * Escond2adap[p][j] * (1.0 - Escond2adap[p][j]) ;
    }
    for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
        SomaDelta2aadap[j] = 0.0 ;
        for( k = 1 ; k <= NUM2aLAYERfunc ; k++ ) {
            SomaDelta2aadap[j] += Pesos2adap[j][k] * DeltaH2adap[k] ;
        }
        DeltaHadap[j] = SomaDelta2aadap[j] * Escondadap[p][j] * (1.0 - Escondadap[p][j]) ;
    }
}

```

```

    }
    for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
        DeltaPesos1adap[0][j] = etaadap * DeltaHadap[j] + alphaadap * DeltaPesos1adap[0][j] ;
        Pesos1adap[0][j] += DeltaPesos1adap[0][j] ;
        for( i = 1 ; i <= NUMENTfunc ; i++ ) {
            DeltaPesos1adap[i][j] = etaadap * Inputadap[p][i] * DeltaHadap[j] + alphaadap *
DeltaPesos1adap[i][j];
            Pesos1adap[i][j] += DeltaPesos1adap[i][j] ;
        }
    }
    for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
        DeltaPesos2adap[0][j] = etaadap * DeltaH2adap[j] + alphaadap * DeltaPesos2adap[0][j] ;
        Pesos2adap[0][j] += DeltaPesos2adap[0][j] ;
        for( i = 1 ; i <= NUM1aLAYERfunc ; i++ ) {
            DeltaPesos2adap[i][j] = etaadap * Escondadap[p][i] * DeltaH2adap[j] + alphaadap *
DeltaPesos2adap[i][j];
            Pesos2adap[i][j] += DeltaPesos2adap[i][j] ;
        }
    }
    for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k ++ ) {
        DeltaPesos1Sadap[0][k] = etaadap * DeltaOadap[k] + alphaadap * DeltaPesos1Sadap[0][k] ;
        Pesos1Sadap[0][k] += DeltaPesos1Sadap[0][k] ;
        for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
            DeltaPesos1Sadap[j][k] = etaadap * Escond2adap[p][j] * DeltaOadap[k] + alphaadap *
DeltaPesos1Sadap[j][k];
            Pesos1Sadap[j][k] += DeltaPesos1Sadap[j][k] ;
        }
    }
    //Define-se o novo erro médio
    Erro_rede_adap[p]=Erro_rede_adap[p-1]*(p-1)+Erro_rede_bat[p];
    Erro_rede_adap[p]=Erro_rede_adap[p]/p; //Evolução do erro médio
    //Se o novo erro é menor que o erro da rede inicial, os pesos são atualizados
    if(Erro_rede_bat[p]-Erro_rede_adap[p]<Erro_rede_bat[p-1]-Erro_rede_adap[p-1]){
        for( j = 1 ; j <= NUM1aLAYERfunc ; j++ ) {
            i=0;
            Pesos1adap[0][j]=Pesos1_adap_s[0][j];
            for( i = 1 ; i <= NUMENTfunc ; i++ ) {
                Pesos1adap[i][j]=Pesos1_adap_s[i][j];
            }
        }
        for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
            i=0;
            Pesos2adap[0][j]=Pesos2_adap_s[0][j];
            for( i = 1 ; i <= NUM1aLAYERfunc ; i++ ) {
                Pesos2adap[i][j]=Pesos2_adap_s[i][j];
            }
        }
        for( k = 1 ; k <= NumSaida ; k ++ ) {
            j=0;
            Pesos1Sadap[0][k]=Pesos1S_adap_s[0][k];
            for( j = 1 ; j <= NUM2aLAYERfunc ; j++ ) {
                Pesos1Sadap[j][k]=Pesos1S_adap_s[j][k];
            }
        }
    }
}
}

```

APÊNDICE E - Extratos do SW criado para análise usando método linear

```

/*
Loop principal do método linear.
Esta parte do código só utiliza a resistência.
Res=a*R+b.
O código atualiza a somente se o erro médio do conjunto diminui.
Depois faz o mesmo com b.
As outras partes do código são análogas.
*/
r=0;
while(r<ninter)           //quantas vezes varia a tabela de pesos inteira
{
    a=a+var;              //primeiro tentar aumentar o a
    c=0;
    while(c<cmax)          //calcular o novo desvio
    {
        fjr[c]=fjR[c]*a+b;
        fjerro[c]=fjSOH[c]-fjr[c];
        c++;
    }
    if(desv_ou_erro)
        desvio_novo=erromedioquad(fjerro,cmax, t);
    else
        desvio_novo=desviopadiao(fjerro,cmax, t);
    if(desvio_novo>=desvio) //aumentar não funcionou, tentar diminuir
    {
        a=a-2*var;        //diminuir o a atual
        c=0;
        while(c<cmax)      //novo calculo do desvio
        {
            fjr[c]=fjR[c]*a+b;
            fjerro[c]=fjSOH[c]-fjr[c];
            c++;
        }
        if(desv_ou_erro)
            desvio_novo=erromedioquad(fjerro,cmax,t);
        else
            desvio_novo=desviopadiao(fjerro,cmax,t);
        if(desvio_novo>=desvio) //não funcionou
            a=a+var;          //voltar ao inicio
    }
    if(desvio_novo<desvio) //atualizar o desvio
        desvio=desvio_novo;
    b=b+var;                //depois tentar aumentar o b
    c=0;
    while(c<cmax)           //calcular o novo desvio
    {
        fjr[c]=fjR[c]*a+b;
        fjerro[c]=fjSOH[c]-fjr[c];
        c++;
    }
    if(desv_ou_erro)
        desvio_novo=erromedioquad(fjerro,cmax, t);
    else
        desvio_novo=desviopadiao(fjerro,cmax, t);
}

```



```

if(desvio_novo>=desvio)                                //aumentar não funcionou, tentar diminuir
{
    b=b-2*var;      //diminuir o a atual
    c=0;
    while(c<cmax)                                     //novo calculo do desvio
    {
        fjres[c]=fjR[c]*a+b;
        fjerro[c]=fjSOH[c]-fjres[c];
        c++;
    }
    if(desv_ou_erro)
        desvio_novo=erromedioquad(fjerro,cmax,t);
    else
        desvio_novo=desviopadiao(fjerro,cmax,t);
    if(desvio_novo>=desvio)                             //não funcionou
        b=b+var;      //voltar ao inicio
    }
    if(desvio_novo<desvio)                             //atualizar o desvio
        desvio=desvio_novo;
    c=0;
    while(c<cmax)                                     //calculo final do desvio
    {
        fjres[c]=fjR[c]*a+b;
        fjerro[c]=fjSOH[c]-fjres[c];
        c++;
    }
    if(desv_ou_erro)
        desvio=erromedioquad(fjerro,cmax,t);
    else
        desvio=desviopadiao(fjerro,cmax,t);
    r++;
} //while(r<rmax)

```

APÊNDICE F – Pesos da rede neural 9x5

Tabela 22 - Pesos da rede neural 9x5.

Pesos para camada inicial		Pesos para camada interna		Pesos para camada de saída	
PesosI1[0][1]	-61,7903	PesosI2[0][1]	-39,4417	Pesos1S[0][1]	-0,36222
PesosI1[1][1]	34,2397	PesosI2[1][1]	-16,1667	Pesos1S[1][1]	0,67579
PesosI1[2][1]	34,01094	PesosI2[2][1]	1,601394	Pesos1S[2][1]	3,921868
PesosI1[0][2]	0,280688	PesosI2[3][1]	-8,00809	Pesos1S[3][1]	0,568782
PesosI1[1][2]	-5,13499	PesosI2[4][1]	27,66003	Pesos1S[4][1]	2,990406
PesosI1[2][2]	51,42062	PesosI2[5][1]	-33,1832	Pesos1S[5][1]	-4,31418
PesosI1[0][3]	-81,6077	PesosI2[6][1]	34,61749		
PesosI1[1][3]	37,00368	PesosI2[7][1]	10,89328		
PesosI1[2][3]	-2,52399	PesosI2[8][1]	3,198584		
PesosI1[0][4]	6,115082	PesosI2[9][1]	73,09585		
PesosI1[1][4]	-3,0524	PesosI2[0][2]	-46,3685		
PesosI1[2][4]	-222,119	PesosI2[1][2]	72,85651		
PesosI1[0][5]	23,10449	PesosI2[2][2]	1,508359		
PesosI1[1][5]	-5,15878	PesosI2[3][2]	26,68519		
PesosI1[2][5]	24,37525	PesosI2[4][2]	84,71968		
PesosI1[0][6]	10,21942	PesosI2[5][2]	-51,7277		
PesosI1[1][6]	-9,64069	PesosI2[6][2]	3,772577		
PesosI1[2][6]	124,3874	PesosI2[7][2]	-3,09644		
PesosI1[0][7]	40,83768	PesosI2[8][2]	-1,74347		
PesosI1[1][7]	-35,4888	PesosI2[9][2]	3,239309		
PesosI1[2][7]	-17,363	PesosI2[0][3]	16,87319		
PesosI1[0][8]	20,37579	PesosI2[1][3]	21,29228		
PesosI1[1][8]	-21,1929	PesosI2[2][3]	-1,27536		
PesosI1[2][8]	-16,6286	PesosI2[3][3]	3,705578		
PesosI1[0][9]	61,9107	PesosI2[4][3]	-12,6808		
PesosI1[1][9]	-43,9442	PesosI2[5][3]	8,185886		
PesosI1[2][9]	-15,7758	PesosI2[6][3]	-19,3325		
		PesosI2[7][3]	-5,7221		
		PesosI2[8][3]	-3,03526		
		PesosI2[9][3]	-114,977		
		PesosI2[0][4]	-2,09829		
		PesosI2[1][4]	-73,2697		
		PesosI2[2][4]	7,432286		
		PesosI2[3][4]	-4,7329		
		PesosI2[4][4]	5,174763		
		PesosI2[5][4]	-2,80904		
		PesosI2[6][4]	-2,70199		
		PesosI2[7][4]	1,441699		
		PesosI2[8][4]	0,995654		

		Pesosl2[9][4]	-0,08398		
		Pesosl2[0][5]	-44,6804		
		Pesosl2[1][5]	59,03354		
		Pesosl2[2][5]	-2,34564		
		Pesosl2[3][5]	16,9085		
		Pesosl2[4][5]	60,6986		
		Pesosl2[5][5]	-32,3137		
		Pesosl2[6][5]	-65,0158		
		Pesosl2[7][5]	-1,20419		
		Pesosl2[8][5]	-1,47339		
		Pesosl2[9][5]	-12,4915		

Fonte: Autor

APÊNDICE G – Tabela de regras obtidas para o modelo de Sugeno de ordem 0

Tabela 23 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 0.

Capacitância em Faradays		Resistência em ohms						
		Extremamente baixa	Muito baixa	Baixa	Média	Média alta	Alta	Muito alta
		Menor que 0,5	Entre 0,25 e 0,75	Entre 0,5 e 1	Entre 0,75 e 1,5	Entre 1 e 2	Entre 1,5 e 2,5	Maior que 2
Extremamente baixa	Menor que 0,005	66,242088	113,515053	69,554504	84,213829	71,945023	34,196495	42,813423
Muito baixa	Entre 0,0025 e 0,0075	130,443176	80,362793	100,888306	102,853676	58,890385	58,134361	58,198921
Baixa	Entre 0,005 e 0,01	140,710388	62,708794	64,380516	39,836681	34,015835	91,363312	60,838486
Média	Entre 0,0075 e 0,015	46,866592	143,717194	106,186363	118,233368	104,01667	32,203949	33,913509
Média alta	Entre 0,01 e 0,02	71,981308	142,20871	14,934685	-46,974869	147,599045	-194,270157	162,017975
Alta	Entre 0,015 e 0,025	110,211113	89,580505	10,630593	70,291374	48,629486	-97,028671	15,173114
Muito alta	Maior que 0,02	115,922508	26,686991	240,00441	12,692685	99,592491	776,425232	36,177345

Fonte: Autor

APÊNDICE H – Tabela de regras obtidas para o modelo de Sugeno de ordem 1

Tabela 24 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 1, regras para Ri.

Capacitância em Faradays		Resistencia						
		Extremamente baixa	Muito baixa	Baixa	Média	Média alta	Alta	Muito alta
		Menor que 0,5	Entre 0,25 e 0,75	Entre 0,5 e 1	Entre 0,75 e 1,5	Entre 1 e 2	Entre 1,5 e 2,5	Maior que 2
Extremamente baixa	Menor que 0,005	750,434	-95,8755	-224,679	-13,5547	14,15435	24,4117	9,702287
Muito baixa	Entre 0,0025 e 0,0075	145,357	58,39591	-33,4838	-62,6397	-18,7152	-42,8851	-90,542
Baixa	Entre 0,005 e 0,01	-22,1285	7,317269	-55,6935	-190,757	-168,067	-44,4171	51,07473
Média	Entre 0,0075 e 0,015	-39,1118	98,37582	45,86558	-88,4286	-276,388	-381,825	79,49555
Média alta	Entre 0,01 e 0,02	109,222	29,64994	-44,7131	154,2484	129,9615	-356,299	45,12535
Alta	Entre 0,015 e 0,025	89,48344	-12,355	158,2059	798,1131	246,6123	180,411	36,22345
Muito alta	Maior que 0,02	-71,4971	145,3116	213,1833	73,65414	39,88324	49,00404	36,22345

Fonte: Autor

Tabela 25 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 1, regras para Ci.

Capacitância em Faradays		Resistencia						
		Extremamente baixa	Muito baixa	Baixa	Média	Média alta	Alta	Muito alta
		Menor que 0,5	Entre 0,25 e 0,75	Entre 0,5 e 1	Entre 0,75 e 1,5	Entre 1 e 2	Entre 1,5 e 2,5	Maior que 2
Extremamente baixa	Menor que 0,005	8631	2561	-9837	-899	-3575	-5471	23711
Muito baixa	Entre 0,0025 e 0,0075	12239	6729	-4198	-4600	2964	-8568	6000
Baixa	Entre 0,005 e 0,01	8682	6781	4226	-3564	19393	-24767	-30427
Média	Entre 0,0075 e 0,015	-1429	6289	3326	11141	-5084	63480	2165
Média alta	Entre 0,01 e 0,02	5206	2965	-6094	9219	-26101	-20197	1000
Alta	Entre 0,015 e 0,025	3326	-894	4156	-49965	-20871	27882	1000
Muito alta	Maior que 0,02	-142	-230	-2058	1418	-924	1000	1000

Fonte: Autor

Tabela 26 - Regras do modelo de Sugeno de ordem 1, regras para bi.

Capacitância em Faradays		Resistencia						
		Extremamente baixa	Muito baixa	Baixa	Média	Média alta	Alta	Muito alta
		Menor que 0,5	Entre 0,25 e 0,75	Entre 0,5 e 1	Entre 0,75 e 1,5	Entre 1 e 2	Entre 1,5 e 2,5	Maior que 2
Extremamente baixa	Menor que 0,005	175,9858	107,5951	291,2306	101,7143	55,66187	9,663413	-30,471
Muito baixa	Entre 0,0025 e 0,0075	25,80713	23,8596	132,7863	169,3122	82,62603	173,6141	230,9082
Baixa	Entre 0,005 e 0,01	5,297134	35,21347	89,98898	287,7916	173,5591	340,4616	223,5313
Média	Entre 0,0075 e 0,015	137,8484	-19,1211	7,519698	47,59178	476,7769	259,3091	-64,7056
Média alta	Entre 0,01 e 0,02	-10,1486	23,79924	158,5077	-265,473	244,0419	-84,6211	2,019254
Alta	Entre 0,015 e 0,025	4,765906	91,61713	-33,2594	140,2463	77,23639	144,4891	0
Muito alta	Maior que 0,02	115,9087	29,30294	51,81171	-36,9481	-12,97	-15,3099	0

Fonte: Autor

APÊNDICE I – Pesos obtidos para a segunda rede neural do método de melhoramento de EOL.

Tabela 27 - Pesos da segunda rede neural.

Pesos para camada inicial		Pesos para camada de saída	
PesosI1[0][1]	95,972503	Pesos1S[0][1]	-0,324029
PesosI1[1][1]	-138,114413	Pesos1S[1][1]	-35,252237
PesosI1[2][1]	11,733063	Pesos1S[2][1]	-0,856673
PesosI1[0][2]	-2,170303	Pesos1S[3][1]	-5,954368
PesosI1[1][2]	-6,285927	Pesos1S[4][1]	4,858648
PesosI1[2][2]	-0,908209	Pesos1S[5][1]	15,603116
PesosI1[0][3]	73,228816	Pesos1S[6][1]	2,415738
PesosI1[1][3]	-70,398192	Pesos1S[7][1]	55,598816
PesosI1[2][3]	43,074535	Pesos1S[8][1]	14,340713
PesosI1[0][4]	46,086164	Pesos1S[9][1]	-4,760764
PesosI1[1][4]	-34,15526	Pesos1S[10][1]	-28,501614
PesosI1[2][4]	425,476742	Pesos1S[11][1]	1,688606
PesosI1[0][5]	-8,725761	Pesos1S[12][1]	-75,957276
PesosI1[1][5]	2,958712	Pesos1S[13][1]	-2,911083
PesosI1[2][5]	-48,88574	Pesos1S[14][1]	-0,688902
PesosI1[0][6]	127,540824	Pesos1S[15][1]	2,31028
PesosI1[1][6]	-130,212125	Pesos1S[16][1]	-1,116536
PesosI1[2][6]	66,402548	Pesos1S[17][1]	-9,391836
PesosI1[0][7]	115,78452	Pesos1S[18][1]	9,598775
PesosI1[1][7]	-97,571047	Pesos1S[19][1]	-4,066406
PesosI1[2][7]	-227,304975	Pesos1S[20][1]	36,800227
PesosI1[0][8]	120,35499	Pesos1S[21][1]	-18,973737
PesosI1[1][8]	-114,169662	Pesos1S[22][1]	-44,929058
PesosI1[2][8]	-41,999765	Pesos1S[23][1]	0,080138
PesosI1[0][9]	337,12661	Pesos1S[24][1]	72,25277
PesosI1[1][9]	-242,395645	Pesos1S[25][1]	1,751879
PesosI1[2][9]	-6,895002		
PesosI1[0][10]	14,906607		
PesosI1[1][10]	-31,076799		
PesosI1[2][10]	34,477918		
PesosI1[0][11]	200,087935		
PesosI1[1][11]	-154,957786		

Pesosl1[2][11]	-63,195838		
Pesosl1[0][12]	202,578214		
Pesosl1[1][12]	-189,595338		
Pesosl1[2][12]	-18,818559		
Pesosl1[0][13]	26,51939		
Pesosl1[1][13]	-27,206125		
Pesosl1[2][13]	-3,221848		
Pesosl1[0][14]	-2,416869		
Pesosl1[1][14]	-5,955662		
Pesosl1[2][14]	-2,50939		
Pesosl1[0][15]	-2,746422		
Pesosl1[1][15]	-5,563742		
Pesosl1[2][15]	5,382628		
Pesosl1[0][16]	-2,324926		
Pesosl1[1][16]	-6,567545		
Pesosl1[2][16]	-2,699763		
Pesosl1[0][17]	103,796153		
Pesosl1[1][17]	-129,377382		
Pesosl1[2][17]	-47,471761		
Pesosl1[0][18]	70,208358		
Pesosl1[1][18]	-88,89779		
Pesosl1[2][18]	165,087645		
Pesosl1[0][19]	-1,027897		
Pesosl1[1][19]	-10,597628		
Pesosl1[2][19]	-3,720547		
Pesosl1[0][20]	39,657073		
Pesosl1[1][20]	-58,714255		
Pesosl1[2][20]	-12,653011		
Pesosl1[0][21]	32,134449		
Pesosl1[1][21]	-25,558412		
Pesosl1[2][21]	-562,738608		
Pesosl1[0][22]	248,532532		
Pesosl1[1][22]	-211,545641		
Pesosl1[2][22]	329,356347		
Pesosl1[0][23]	-2,419807		
Pesosl1[1][23]	-4,927977		
Pesosl1[2][23]	-2,104133		
Pesosl1[0][24]	321,663367		
Pesosl1[1][24]	-301,271333		

Pesosl1[2][24]	-13,043971		
Pesosl1[0][25]	-340,187903		
Pesosl1[1][25]	216,191774		
Pesosl1[2][25]	2,866445		

Fonte: Autor

APÊNDICE J – Pesos obtidos para a terceira rede neural do método de melhoramento de EOL.

Tabela 28 - Pesos da terceira rede neural.

Pesos para camada inicial		Pesos para camada interna		Pesos para camada de saída	
PesosI1[0][1]	15,534962	PesosI2[0][1]	-36,744452	PesosIS[0][1]	-25,699599
PesosI1[1][1]	-7,145164	PesosI2[1][1]	-6,579665	PesosIS[1][1]	25,915149
PesosI1[2][1]	10,257556	PesosI2[2][1]	40,554723	PesosIS[2][1]	25,918824
PesosI1[3][1]	-9,445191	PesosI2[3][1]	88,113629		
PesosI1[4][1]	1,212491	PesosI2[4][1]	29,236552		
PesosI1[0][2]	2,073742	PesosI2[5][1]	18,149275		
PesosI1[1][2]	29,577284	PesosI2[6][1]	-46,745236		
PesosI1[2][2]	2,270529	PesosI2[7][1]	-41,124444		
PesosI1[3][2]	-48,215026	PesosI2[8][1]	-82,095923		
PesosI1[4][2]	-0,682035	PesosI2[9][1]	48,275225		
PesosI1[0][3]	0,446169	PesosI2[10][1]	28,757174		
PesosI1[1][3]	59,456065	PesosI2[0][2]	-3,20305		
PesosI1[2][3]	-2,435603	PesosI2[1][2]	19,452097		
PesosI1[3][3]	-103,649053	PesosI2[2][2]	-18,304784		
PesosI1[4][3]	9,898563	PesosI2[3][2]	-29,171596		
PesosI1[0][4]	62,560633	PesosI2[4][2]	30,0321		
PesosI1[1][4]	-43,291508	PesosI2[5][2]	45,47485		
PesosI1[2][4]	17,87446	PesosI2[6][2]	-41,574954		
PesosI1[3][4]	-17,062553	PesosI2[7][2]	-36,644281		
PesosI1[4][4]	-8,734034	PesosI2[8][2]	30,816271		
PesosI1[0][5]	36,37777	PesosI2[9][2]	47,901926		
PesosI1[1][5]	-10,368285	PesosI2[10][2]	0,679118		
PesosI1[2][5]	25,932433				
PesosI1[3][5]	-37,416801				
PesosI1[4][5]	-3,455386				
PesosI1[0][6]	-56,925067				
PesosI1[1][6]	27,53069				
PesosI1[2][6]	-26,094798				
PesosI1[3][6]	35,622514				
PesosI1[4][6]	-0,617971				
PesosI1[0][7]	-40,519731				
PesosI1[1][7]	1,124078				
PesosI1[2][7]	-24,514711				

Pesosl1[3][7]	44,963145				
Pesosl1[4][7]	6,595631				
Pesosl1[0][8]	65,157298				
Pesosl1[1][8]	-73,210071				
Pesosl1[2][8]	18,130531				
Pesosl1[3][8]	52,810427				
Pesosl1[4][8]	-19,538961				
Pesosl1[0][9]	92,835524				
Pesosl1[1][9]	-62,681475				
Pesosl1[2][9]	24,156769				
Pesosl1[3][9]	-12,489138				
Pesosl1[4][9]	-13,207605				
Pesosl1[0][10]	22,425751				
Pesosl1[1][10]	-39,477559				
Pesosl1[2][10]	-0,059391				
Pesosl1[3][10]	34,191962				
Pesosl1[4][10]	-2,978487				

Fonte: Autor

APÊNDICE K – Relação dos modelos de baterias utilizados.

Tabela 29 – Relação dos modelos de baterias utilizados.

Número da Bateria	Modelo
1	HCT
2	Expower 59
3	HCT
4	HCT
5	HCT
6	HCT
7	Expower 57
8	HCT
9	HCT
10	Expower 57
11	Expower 57
12	Expower 59
13	Expower 59
14	Expower 59
15	Expower 59
16	Expower 59
17	Expower 59
18	Expower 57
19	Expower 57
20	Expower 57
21	Expower 57

Fonte: Autor

APÊNDICE L -Relação dos dados obtidos.

Tabela 30 – Dados obtidos.

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
1/1	0,2858	0,0558	03:48:00	82,61
1/2	0,3154	0,0547	03:46:30	82,07
1/3	0,2864	0,0413	03:45:00	81,52
1/4	0,4247	0,0425	03:43:00	80,8
1/5	0,4247	0,0425	03:42:00	80,43
1/6	0,3956	0,0195	03:38:30	79,17
1/7	0,2916	0,0243	03:41:30	80,25
1/8	0,4255	0,0205	03:41:00	80,07
1/9	0,4707	0,02	03:42:30	80,62
1/10	0,4383	0,0212	03:38:30	79,17
1/11	0,4777	0,0175	03:38:30	79,17
1/12	0,5362	0,0148	03:40:30	79,89
1/13	0,7597	0,0108	03:35:00	77,9
1/14	1,0506	0,0066	03:26:30	74,82
1/15	1,1066	0,005	03:24:30	74,09
1/16	1,2451	0,0049	03:18:00	71,74
1/17	1,1775	0,0038	03:19:00	72,1
1/18	1,0741	0,0069	03:27:30	75,18
1/19	0,9477	0,0077	03:30:00	76,09
1/20	1,1895	0,0051	03:18:30	71,92
1/21	1,5034	0,0042	03:03:00	66,3
1/22	0,5014	0,016	03:40:00	79,71
1/23	0,7189	0,0114	03:34:30	77,72
1/24	0,9497	0,007	03:26:30	74,82
1/25	0,517	0,0162	03:39:00	79,35
1/26	1,472	0,0051	03:13:00	69,93
1/27	1,0103	0,0077	03:22:00	73,19
1/28	1,3243	0,004	02:00:30	43,66
1/29	1,2761	0,0053	03:05:30	67,21
1/30	0,8908	0,0079	03:15:30	70,83
1/31	0,8251	0,0091	03:30:00	76,09
1/32	1,8059	0,003	02:42:00	58,7
1/33	0,5814	0,0145	03:38:30	79,17
1/34	0,4904	0,0181	03:37:00	78,62
1/35	0,7995	0,0083	03:33:00	77,17
1/36	0,6426	0,0106	03:38:30	79,17
1/37	0,9503	0,0065	03:24:00	73,91
1/38	0,7788	0,0081	03:33:00	77,17
1/39	1,5916	0,0019	02:24:00	52,17
1/40	1,0538	0,0065	02:55:00	63,41
1/41	1,0911	0,0062	03:23:00	73,55
1/42	1,2759	0,0052	03:14:30	70,47
1/43	0,9247	0,0073	03:32:00	76,81
1/44	0,5031	0,0155	03:43:30	80,98
1/45	0,8626	0,0074	03:34:00	77,54
1/46	1,3959	0,0071	02:37:30	57,07
1/47	1,1387	0,0057	03:19:30	72,28
1/48	2,0041	0,004	01:31:30	33,15
1/49	1,6544	0,0035	02:56:00	63,77
1/50	1,2253	0,0056	01:47:00	38,77

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
2/1	0,544	0,0209	03:32:00	88,33
2/2	0,7725	0,0075	03:27:00	86,25
2/3	0,5847	0,0077	03:35:00	89,58
2/4	0,3239	0,0155	03:41:30	92,29
2/5	0,4187	0,012	03:37:00	90,42
2/6	0,3399	0,0131	03:44:00	93,33
2/7	0,4117	0,0113	03:41:30	92,29
2/8	0,4408	0,0062	03:41:00	92,08
2/9	0,546	0,0106	03:37:30	90,63
2/10	0,5493	0,0115	03:36:30	90,21
2/11	0,4183	0,0109	03:42:00	92,5
2/12	0,6687	0,0078	03:35:00	89,58
2/13	0,7709	0,0041	03:30:00	87,5
2/14	0,416	0,0131	03:42:00	92,5
2/15	0,4089	0,0136	03:42:30	92,71
2/16	0,4356	0,0113	03:41:30	92,29
2/17	0,4462	0,012	03:39:00	91,25
2/18	0,418	0,0118	03:41:30	92,29
2/19	0,3545	0,0094	03:43:00	92,92
2/20	0,3432	0,0143	03:42:30	92,71
2/21	0,3158	0,0171	03:45:00	93,75
2/22	0,5307	0,0093	03:36:00	90
2/23	0,3401	0,0119	03:43:00	92,92
2/24	0,5693	0,0082	03:33:00	88,75
2/25	0,4272	0,0099	03:39:00	91,25
2/26	0,4057	0,0114	03:40:30	91,88
2/27	0,3979	0,0107	03:40:30	91,88
2/28	0,3661	0,0122	03:42:00	92,5
2/29	0,3551	0,015	03:42:30	92,71
2/30	0,3698	0,0154	03:43:00	92,92
2/31	0,4026	0,0121	03:41:30	92,29
2/32	0,3362	0,0175	03:42:30	92,71
2/33	0,3676	0,0165	03:43:00	92,92
2/34	0,3777	0,0128	03:42:00	92,5
2/35	0,3885	0,0131	03:43:00	92,92
2/36	0,4003	0,011	03:41:00	92,08
2/37	0,4349	0,0112	03:41:00	92,08
2/38	0,307	0,0165	03:44:30	93,54
2/39	0,3713	0,0124	03:43:30	93,13
2/40	0,4062	0,0113	03:41:00	92,08
2/41	0,4728	0,0112	03:40:30	91,88
2/42	0,4287	0,013	03:40:30	91,88
2/43	0,3645	0,0108	03:41:30	92,29
2/44	0,4011	0,0121	03:40:30	91,88
2/45	0,4301	0,0132	03:41:00	92,08
2/46	0,4167	0,0149	03:41:30	92,29
2/47	0,7073	0,0049	03:31:30	88,13
2/48	1,3815	0,0057	03:10:30	79,38
2/49	2,1418	0,0038	02:11:00	54,58
2/50	1,6957	0,0043	02:05:00	52,08

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
3/1	0.2122	0.0233	04:28:30	97.28
3/2	0.2146	0.0234	04:31:30	98.37
3/3	0.2165	0.0227	04:31:30	98.37
3/4	0.215	0.0338	04:31:30	98.37
3/5	0.2162	0.0266	04:31:30	98.37
3/6	0.2186	0.0234	04:32:30	98.73
3/7	0.2217	0.0281	04:33:00	98.91
3/8	0.2283	0.0211	04:32:30	98.73
3/9	0.2143	0.0233	04:33:30	99.09
3/10	0.2128	0.0202	04:35:00	99.64
3/11	0.2397	0.0264	04:33:30	99.09
3/12	0.253	0.0212	04:34:00	99.28
3/13	0.2318	0.0216	04:32:30	98.73
3/14	0.2824	0.0197	04:32:30	98.73
3/15	0.2789	0.0164	04:30:30	98.01
3/16	0.2462	0.0178	04:34:00	99.28
3/17	0.2243	0.0231	04:33:00	98.91
3/18	0.2331	0.0235	04:32:30	98.73
3/19	0.2241	0.0222	04:32:00	98.55
3/20	0.8237	0.0031	04:08:30	90.04
3/21	0.3376	0.0142	04:29:30	97.64
3/22	0.2937	0.0201	04:31:30	98.37
3/23	1.5077	0.0031	03:31:30	76.63
3/24	0.814	0.0053	04:05:00	88.77
3/25	1.105	0.0037	03:58:30	86.41
3/26	1.8198	0.0025	03:16:00	71.01
3/27	1.0005	0.0053	03:59:00	86.59
3/28	1.3148	0.003	03:46:00	81.88
3/29	0.4112	0.0122	04:27:00	96.74
3/30	1.3119	0.004	03:48:00	82.61
3/31	1.4748	0.0035	03:34:00	77.54
3/32	0.3561	0.0154	04:28:00	97.1
3/33	0.2964	0.0143	04:31:00	98.19
3/34	0.7556	0.0057	04:03:00	88.04
3/35	1.1175	0.0038	03:55:00	85.14
3/36	0.4094	0.0099	04:24:00	95.65
3/37	0.4555	0.0072	04:19:30	94.02
3/38	0.4925	0.0077	04:14:00	92.03
3/39	0.3012	0.0137	04:26:30	96.56
3/40	0.3122	0.0119	04:24:30	95.83
3/41	0.3151	0.0167	04:27:30	96.92
3/42	0.5997	0.0078	04:18:00	93.48
3/43	0.3413	0.0161	04:28:00	97.1
3/44	1.044	0.0065	02:59:00	64.86
3/45	1.0267	0.005	04:02:00	87.68
3/46	1.0225	0.0045	03:58:00	86.23
3/47	1.2847	0.005	03:15:30	70.83
3/48	1.2763	0.0032	03:51:30	83.88
3/49	2.1803	0.0048	03:32:30	76.99
3/50	0.8552	0.0053	04:08:00	89.86

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
4/1	0.5682	0.0174	03:48:30	82.79
4/2	0.7552	0.01	03:39:00	79.35
4/3	0.7979	0.0096	03:39:00	79.35
4/4	0.7957	0.0097	03:41:30	80.25
4/5	0.9995	0.0072	03:33:30	77.36
4/6	1.4237	0.0043	03:10:00	68.84
4/7	0.4997	0.0179	03:49:30	83.15
4/8	0.3622	0.0243	03:54:00	84.78
4/9	0.3993	0.0196	03:55:00	85.14
4/10	0.4047	0.0183	03:51:00	83.7
4/11	0.402	0.0195	03:53:30	84.6
4/12	0.369	0.0198	03:51:30	83.88
4/13	0.3509	0.0182	03:52:00	84.06
4/14	0.6788	0.0091	03:44:30	81.34
4/15	0.494	0.0144	03:51:00	83.7
4/16	0.381	0.0144	03:57:00	85.87
4/17	2.2437	0.0023	01:50:30	40.04
4/18	0.5598	0.0132	03:51:00	83.7
4/19	0.9252	0.0077	03:40:30	79.89
4/20	0.9128	0.0069	03:46:00	81.88
4/21	0.9638	0.0065	03:37:00	78.62
4/22	0.3802	0.0205	03:58:30	86.41
4/23	1.6464	0.004	03:04:30	66.85
4/24	0.87	0.0079	03:47:30	82.43
4/25	1.0771	0.0054	03:39:30	79.53
4/26	1.7427	0.0033	03:19:00	72.1
4/27	1.045	0.0062	03:42:30	80.62
4/28	1.51	0.0038	03:13:30	70.11
4/29	1.3664	0.0043	03:27:00	75
4/30	0.7926	0.0079	03:47:30	82.43
4/31	1.2861	0.0041	03:30:00	76.09
4/32	0.982	0.0063	03:44:00	81.16
4/33	1.0188	0.0066	03:01:30	65.76
4/34	0.7307	0.0093	03:48:30	82.79
4/35	0.9274	0.0073	03:42:30	80.62
4/36	0.8704	0.008	03:42:00	80.43
4/37	2.3814	0.0031	02:49:30	61.41
4/38	1.5488	0.0033	03:15:00	70.65
4/39	0.9589	0.0147	01:14:30	26.99
4/40	1.2915	0.0076	03:29:00	75.72
4/41	1.4729	0.0034	02:28:30	53.8
4/42	1.0849	0.003	03:24:00	73.91
4/43	0.6224	0.0102	03:52:30	84.24
4/44	0.5105	0.0164	03:56:00	85.51
4/45	0.5855	0.014	03:53:00	84.42
4/46	0.6679	0.0106	03:50:00	83.33
4/47	0.5659	0.0135	03:55:30	85.33
4/48	0.5255	0.0138	03:56:30	85.69
4/49	2.0892	0.0034	02:55:30	63.59
4/50	1.8942	0.0033	03:02:00	65.94

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
5/1	0.8946	0.0071	03:36:00	78.26
5/2	0.2167	0.0178	03:47:30	82.43
5/3	0.2531	0.0303	03:46:00	81.88
5/4	0.3277	0.0254	03:45:30	81.7
5/5	0.2273	0.0255	03:42:00	80.43
5/6	0.2588	0.0209	03:37:00	78.62
5/7	0.3659	0.0237	03:37:30	78.8
5/8	0.2496	0.0198	03:35:00	77.9
5/9	0.2816	0.0233	03:31:30	76.63
5/10	0.3311	0.0205	03:29:00	75.72
5/11	0.3595	0.0206	03:28:30	75.54
5/12	0.3199	0.0252	03:28:00	75.36
5/13	0.2921	0.0246	03:27:30	75.18
5/14	0.5754	0.0133	03:28:00	75.36
5/15	0.4628	0.0163	03:29:30	75.91
5/16	0.6483	0.0119	03:25:00	74.28
5/17	1.3584	0.0083	03:06:30	67.57
5/18	1.1269	0.0052	03:03:00	66.3
5/19	1.0096	0.0072	03:13:00	69.93
5/20	1.977	0.0031	01:54:30	41.49
5/21	0.5508	0.0143	03:28:00	75.36
5/22	0.7681	0.0089	03:23:00	73.55
5/23	0.9137	0.007	03:18:30	71.92
5/24	1.6264	0.0036	02:44:30	59.6
5/25	1.4943	0.0044	02:51:30	62.14
5/26	1.3967	0.0024	02:20:30	50.91
5/27	1.6062	0.0036	02:33:30	55.62
5/28	1.3584	0.0075	02:49:00	61.23
5/29	2.2031	0.0037	02:27:00	53.26
5/30	0.8617	0.007	01:25:00	30.8
5/31	1.2526	0.0047	03:00:00	65.22
5/32	1.0575	0.0057	03:11:30	69.38
5/33	2.0239	0.0043	02:35:30	56.34
5/34	1.141	0.0058	03:11:00	69.2
5/35	0.9415	0.0073	03:14:30	70.47
5/36	1.6421	0.0043	02:34:30	55.98
5/37	1.5737	0.004	02:33:00	55.43
5/38	1.2064	0.0061	03:05:30	67.21
5/39	1.806	0.0042	02:07:30	46.2
5/40	1.8081	0.0047	01:56:00	42.03
5/41	0.7442	0.0114	03:21:00	72.83
5/42	0.7957	0.0095	03:17:30	71.56
5/43	0.999	0.0063	03:15:00	70.65
5/44	1.637	0.0037	02:30:30	54.53
5/45	0.5786	0.016	03:30:00	76.09
5/46	1.3194	0.0058	03:01:30	65.76
5/47	1.0927	0.0073	02:11:30	47.64
5/48	1.2831	0.0041	02:54:00	63.04
5/49	0.9301	0.0086	03:26:00	74.64
5/50	1.2133	0.0057	02:54:00	63.04

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
6/1	0.7691	0.0098	04:19:30	94.02
6/2	1.2316	0.0038	03:38:00	78.99
6/3	1.1841	0.0066	03:41:00	80.07
6/4	2.0699	0.0042	01:43:00	37.32
6/5	1.0118	0.005	03:56:00	85.51
6/6	1.0048	0.0053	03:51:00	83.7
6/7	0.4243	0.0151	04:21:00	94.57
6/8	2.4688	0.0023	01:59:30	43.3
6/9	0.6825	0.0078	04:12:00	91.3
6/10	1.2503	0.0046	03:41:00	80.07
6/11	0.503	0.0125	04:16:30	92.93
6/12	1.6256	0.0085	03:36:30	78.44
6/13	0.9337	0.0057	03:48:30	82.79
6/14	0.9106	0.0065	03:59:30	86.78
6/15	0.3728	0.0196	04:23:30	95.47
6/16	0.4195	0.0148	04:19:00	93.84
6/17	0.5113	0.0128	04:21:30	94.75
6/18	0.6238	0.0086	04:18:00	93.48
6/19	0.6876	0.008	04:08:30	90.04
6/20	0.9099	0.0064	03:55:00	85.14
6/21	1.1948	0.0068	03:41:00	80.07
6/22	0.906	0.0067	04:07:00	89.49
6/23	1.6312	0.0042	03:23:00	73.55
6/24	1.0784	0.0062	03:55:00	85.14
6/25	0.6731	0.0059	04:12:30	91.49
6/26	1.3375	0.0044	03:39:30	79.53
6/27	1.2668	0.0048	03:27:30	75.18
6/28	1.2375	0.0036	03:43:30	80.98
6/29	1.3531	0.0035	03:27:00	75
6/30	1.1731	0.0036	03:47:00	82.25
6/31	0.3723	0.021	04:27:00	96.74
6/32	1.9601	0.0031	02:44:00	59.42
6/33	1.3703	0.0045	03:28:30	75.54
6/34	1.5125	0.0083	03:15:00	70.65
6/35	0.9864	0.0058	03:48:00	82.61
6/36	0.6771	0.0093	04:07:30	89.67
6/37	1.8199	0.0072	02:48:30	61.05
6/38	2.1466	0.0018	02:04:00	44.93
6/39	1.3634	0.005	03:39:00	79.35
6/40	1.0985	0.0049	03:46:00	81.88
6/41	1.9331	0.0026	02:58:00	64.49
6/42	0.7809	0.0074	04:06:30	89.31
6/43	1.5404	0.004	01:17:30	28.08
6/44	0.4313	0.0166	04:21:30	94.75
6/45	2.3336	0.0025	02:41:00	58.33
6/46	1.3462	0.0041	02:39:30	57.79
6/47	0.5597	0.0117	04:16:00	92.75
6/48	2.1836	0.0028	02:49:00	61.23
6/49	1.1786	0.0053	03:40:30	79.89
6/50	1.0945	0.005	03:45:00	81.52

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
7/1	0.285	0.0159	04:19:30	108.13
7/2	0.3514	0.0136	03:37:30	90.63
7/3	0.4244	0.0123	03:36:30	90.21
7/4	0.5343	0.006	03:33:00	88.75
7/5	0.2995	0.0229	03:39:30	91.46
7/6	0.2833	0.0245	03:42:00	92.5
7/7	0.4367	0.0073	03:33:30	88.96
7/8	0.4122	0.0117	03:35:30	89.79
7/9	0.3937	0.0116	03:34:00	89.17
7/10	1.6098	0.002	02:39:00	66.25
7/11	0.6386	0.0078	03:27:30	86.46
7/12	0.6566	0.006	03:23:00	84.58
7/13	0.5158	0.0077	03:30:30	87.71
7/14	0.5744	0.0067	03:28:30	86.88
7/15	0.6728	0.0055	03:19:30	83.13
7/16	1.1033	0.0045	01:11:00	29.58
7/17	1.4573	0.004	02:44:00	68.33
7/18	1.4655	0.0043	02:36:00	65
7/19	0.3163	0.0133	03:36:00	90
7/20	0.5112	0.008	03:29:00	87.08
7/21	1.1625	0.005	02:47:00	69.58
7/22	1.2749	0.0033	02:50:30	71.04
7/23	0.8241	0.0031	03:18:30	82.71
7/24	1.011	0.0054	03:15:00	81.25
7/25	1.4834	0.0031	02:23:00	59.58
7/26	1.6061	0.0069	01:45:30	43.96
7/27	1.3008	0.0031	03:03:30	76.46
7/28	0.6721	0.0076	03:23:30	84.79
7/29	1.9739	0.0065	02:42:00	67.5
7/30	0.9246	0.0037	03:04:30	76.88
7/31	2.1812	0.0031	02:06:30	52.71
7/32	0.7853	0.0058	02:59:30	74.79
7/33	0.5888	0.0085	03:27:00	86.25
7/34	0.7421	0.0066	03:17:00	82.08
7/35	0.7284	0.0066	02:13:00	55.42
7/36	0.9734	0.0074	02:08:00	53.33
7/37	1.0794	0.0045	03:10:30	79.38
7/38	0.8137	0.0078	03:07:00	77.92
7/39	0.4361	0.0084	03:30:30	87.71
7/40	1.2654	0.0054	01:09:00	28.75
7/41	1.4145	0.0055	01:26:30	36.04
7/42	1.1528	0.0029	03:08:00	78.33
7/43	1.5191	0.0031	02:53:30	72.29
7/44	1.2631	0.0139	01:47:30	44.79
7/45	0.4641	0.0097	03:32:00	88.33
7/46	1.3299	0.0062	02:38:00	65.83
7/47	1.0396	0.004	02:21:30	58.96
7/48	2.1197	0.0039	02:39:30	66.46
7/49	0.7439	0.0063	02:12:30	55.21
7/50	1.2324	0.0039	03:04:30	76.88

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
8/1	0.4737	0.0183	04:09:30	90.4
8/2	0.4752	0.0167	03:54:00	84.78
8/3	0.4944	0.016	03:57:30	86.05
8/4	0.3647	0.0243	03:58:00	86.23
8/5	0.3633	0.0225	04:00:00	86.96
8/6	0.3206	0.0242	04:06:30	89.31
8/7	0.3527	0.0216	04:04:00	88.41
8/8	0.8733	0.0055	03:48:30	82.79
8/9	0.3747	0.0184	04:04:00	88.41
8/10	0.4251	0.0168	04:02:00	87.68
8/11	0.3785	0.0191	04:01:00	87.32
8/12	0.7262	0.008	03:54:00	84.78
8/13	0.7339	0.0072	03:54:00	84.78
8/14	0.4989	0.0141	03:58:30	86.41
8/15	0.8792	0.0066	03:55:00	85.14
8/16	0.6703	0.0089	03:54:00	84.78
8/17	0.8266	0.0072	03:52:00	84.06
8/18	0.9675	0.0055	03:44:00	81.16
8/19	0.6242	0.0103	03:57:00	85.87
8/20	0.7377	0.008	03:54:00	84.78
8/21	1.494	0.0022	03:13:00	69.93
8/22	1.5316	0.0046	03:21:30	73.01
8/23	0.8736	0.0071	03:50:30	83.51
8/24	0.7336	0.0072	03:55:00	85.14
8/25	0.6132	0.0089	04:00:00	86.96
8/26	2.1043	0.0042	01:07:00	24.28
8/27	1.4942	0.0038	03:19:30	72.28
8/28	1.5802	0.0033	03:07:30	67.93
8/29	0.7852	0.0072	03:55:30	85.33
8/30	0.8167	0.0062	03:54:00	84.78
8/31	0.4858	0.0148	04:06:00	89.13
8/32	0.5528	0.0123	03:59:30	86.78
8/33	0.9726	0.0058	03:46:00	81.88
8/34	1.0242	0.0059	03:42:30	80.62
8/35	0.978	0.0062	03:48:30	82.79
8/36	1.3433	0.0044	03:31:30	76.63
8/37	1.1157	0.0047	03:43:30	80.98
8/38	2.3947	0.0018	01:16:00	27.54
8/39	1.3487	0.0032	02:58:30	64.67
8/40	1.4728	0.003	03:31:00	76.45
8/41	0.8363	0.0074	03:53:00	84.42
8/42	1.8112	0.0037	01:09:30	25.18
8/43	2.1097	0.0032	01:57:30	42.57
8/44	1.9842	0.0026	01:16:00	27.54
8/45	1.7597	0.0024	02:10:00	47.1
8/46	0.7515	0.0075	03:52:00	84.06
8/47	1.329	0.0085	03:43:30	80.98
8/48	2.0604	0.0018	00:59:30	21.56
8/49	1.7842	0.0035	02:53:00	62.68
8/50	1.7001	0.0046	02:46:00	60.14

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
9/1	0.4355	0.0129	04:29:00	97.46
9/2	0.4651	0.0148	04:27:00	96.74
9/3	0.5422	0.0104	04:23:00	95.29
9/4	0.4053	0.0163	04:31:00	98.19
9/5	0.2776	0.0233	04:33:00	98.91
9/6	0.334	0.0165	04:33:00	98.91
9/7	0.2802	0.0246	04:36:30	100.18
9/8	0.3144	0.016	04:34:30	99.46
9/9	0.327	0.0197	04:37:00	100.36
9/10	0.3308	0.0209	04:36:00	100
9/11	0.3595	0.0192	04:33:00	98.91
9/12	0.3433	0.0184	04:30:30	98.01
9/13	0.3502	0.0178	04:29:30	97.64
9/14	0.3617	0.0212	04:34:00	99.28
9/15	0.4289	0.0159	04:28:00	97.1
9/16	0.2926	0.0139	04:34:30	99.46
9/17	0.3622	0.0184	04:33:00	98.91
9/18	0.382	0.0172	04:33:00	98.91
9/19	0.392	0.0174	04:32:30	98.73
9/20	0.2813	0.0223	04:36:30	100.18
9/21	0.501	0.0118	04:25:00	96.01
9/22	0.5341	0.0121	04:28:00	97.1
9/23	0.3724	0.018	04:33:00	98.91
9/24	0.3736	0.0183	04:32:00	98.55
9/25	0.3838	0.0171	04:32:00	98.55
9/26	0.3869	0.0162	04:32:30	98.73
9/27	0.8224	0.0061	04:13:30	91.85
9/28	1.2068	0.0043	03:53:00	84.42
9/29	0.7605	0.0064	04:11:30	91.12
9/30	0.8976	0.0057	04:08:00	89.86
9/31	1.3471	0.0065	03:19:30	72.28
9/32	1.4927	0.003	03:34:30	77.72
9/33	1.6778	0.0032	03:18:30	71.92
9/34	0.5064	0.012	04:25:30	96.2
9/35	0.6125	0.0095	04:20:00	94.2
9/36	0.397	0.0171	04:32:30	98.73
9/37	0.4331	0.0158	04:30:30	98.01
9/38	0.7944	0.0068	04:08:30	90.04
9/39	2.2174	0.0016	01:59:00	43.12
9/40	2.0976	0.0029	02:24:30	52.36
9/41	0.6199	0.0111	04:17:00	93.12
9/42	0.9749	0.0042	04:12:00	91.3
9/43	0.7935	0.0062	04:09:00	90.22
9/44	1.3472	0.0044	01:29:30	32.43
9/45	1.6763	0.0039	01:52:30	40.76
9/46	1.2991	0.0077	03:59:00	86.59
9/47	1.4361	0.0037	03:35:00	77.9
9/48	0.8219	0.0073	04:09:30	90.4
9/49	1.0725	0.0046	04:00:00	86.96
9/50	0.804	0.0078	04:14:30	92.21

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
10/1	0.3206	0.0133	03:40:00	91.67
10/2	0.3677	0.0117	03:31:30	88.13
10/3	0.3855	0.0116	03:31:00	87.92
10/4	0.3411	0.0191	03:32:30	88.54
10/5	0.2881	0.0189	03:36:00	90
10/6	0.8742	0.0048	03:14:00	80.83
10/7	0.4342	0.0095	03:31:00	87.92
10/8	0.4467	0.0124	03:30:30	87.71
10/9	0.4201	0.0112	03:30:30	87.71
10/10	0.3052	0.0167	03:33:00	88.75
10/11	0.3039	0.0169	03:34:30	89.38
10/12	0.3491	0.0111	03:33:30	88.96
10/13	0.3568	0.0133	03:33:00	88.75
10/14	0.3948	0.0116	03:27:30	86.46
10/15	0.423	0.0085	03:32:30	88.54
10/16	0.4469	0.0102	03:30:30	87.71
10/17	0.3723	0.013	03:32:30	88.54
10/18	1.0774	0.0079	03:10:00	79.17
10/19	0.443	0.0083	03:34:30	89.38
10/20	0.5751	0.0065	03:25:00	85.42
10/21	0.4828	0.0097	03:32:30	88.54
10/22	0.9676	0.0048	02:53:00	72.08
10/23	0.8422	0.0071	03:12:30	80.21
10/24	1.0652	0.0052	03:07:00	77.92
10/25	1.7792	0.0024	02:28:00	61.67
10/26	1.7903	0.0022	02:29:00	62.08
10/27	1.0219	0.0083	02:27:00	61.25
10/28	1.3406	0.0034	02:56:30	73.54
10/29	0.5754	0.0102	03:28:00	86.67
10/30	1.2469	0.0067	01:48:00	45
10/31	0.5236	0.0076	03:25:30	85.63
10/32	1.1146	0.0053	03:04:30	76.88
10/33	1.3701	0.0132	02:53:30	72.29
10/34	0.4778	0.0098	03:31:30	88.13
10/35	0.8529	0.0046	03:13:00	80.42
10/36	1.675	0.0052	02:20:00	58.33
10/37	0.8408	0.0046	03:17:30	82.29
10/38	1.975	0.0032	02:53:00	72.08
10/39	0.8993	0.006	03:13:00	80.42
10/40	0.9906	0.0068	02:59:30	74.79
10/41	1.9962	0.0031	01:15:30	31.46
10/42	0.3024	0.0154	03:37:30	90.63
10/43	0.3167	0.0201	03:36:00	90
10/44	1.3363	0.0184	02:55:00	72.92
10/45	2.0925	0.003	01:26:30	36.04
10/46	1.5828	0.0062	01:55:00	47.92
10/47	0.8306	0.0055	03:15:30	81.46
10/48	1.6166	0.0056	02:38:30	66.04
10/49	1.7519	0.0044	02:57:00	73.75
10/50	1.0116	0.0055	03:10:30	79.38

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
11/1	0.2164	0.0222	03:46:00	94.17
11/2	0.2249	0.0344	03:44:30	93.54
11/3	0.2258	0.0216	03:45:30	93.96
11/4	0.2291	0.0157	03:45:30	93.96
11/5	0.2247	0.0193	03:46:30	94.38
11/6	0.3117	0.0158	03:43:30	93.13
11/7	0.2435	0.0231	03:45:30	93.96
11/8	0.2739	0.0137	03:44:00	93.33
11/9	0.2627	0.0206	03:43:30	93.13
11/10	0.2412	0.0251	03:48:30	95.21
11/11	0.2651	0.0229	03:48:00	95
11/12	0.2466	0.0213	03:49:00	95.42
11/13	0.2743	0.0174	03:45:00	93.75
11/14	0.2643	0.0141	03:49:30	95.63
11/15	0.2487	0.0183	03:49:30	95.63
11/16	0.2515	0.0189	03:48:30	95.21
11/17	0.2418	0.0219	03:48:00	95
11/18	0.2547	0.0187	03:46:30	94.38
11/19	0.2596	0.0184	03:48:00	95
11/20	0.2602	0.0183	03:47:30	94.79
11/21	0.4228	0.0102	03:41:30	92.29
11/22	0.3425	0.0139	03:45:00	93.75
11/23	0.3835	0.009	03:44:30	93.54
11/24	0.3627	0.0146	03:45:30	93.96
11/25	0.2817	0.0292	03:47:00	94.58
11/26	0.7384	0.0038	03:24:30	85.21
11/27	0.2932	0.0167	03:47:30	94.79
11/28	0.7508	0.0053	03:30:00	87.5
11/29	1.1757	0.0024	03:11:30	79.79
11/30	0.5551	0.0058	03:35:30	89.79
11/31	0.4746	0.0086	03:38:30	91.04
11/32	0.2778	0.0185	03:46:30	94.38
11/33	0.4748	0.0086	03:37:30	90.63
11/34	0.4408	0.0081	03:39:30	91.46
11/35	0.4927	0.0013	03:38:30	91.04
11/36	0.4539	0.0068	03:40:30	91.88
11/37	0.6059	0.0071	03:32:30	88.54
11/38	0.8145	0.0045	03:13:00	80.42
11/39	0.7601	0.0043	03:24:00	85
11/40	0.6281	0.0068	03:30:30	87.71
11/41	0.5665	0.0066	03:33:00	88.75
11/42	0.4859	0.0073	03:38:30	91.04
11/43	0.9836	0.0039	03:11:00	79.58
11/44	1.5664	0.0059	03:02:00	75.83
11/45	2.073	0.003	01:26:30	36.04
11/46	1.8586	0.0041	02:59:30	74.79
11/47	0.5018	0.0084	03:35:00	89.58
11/48	1.4386	0.0045	01:01:30	25.63
11/49	0.8536	0.0047	03:26:00	85.83
11/50	0.9371	0.004	03:15:00	81.25

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
12/1	0.9972	0.0046	03:27:30	86.46
12/2	1.3906	0.0056	01:54:00	47.5
12/3	0.2289	0.0224	03:53:00	97.08
12/4	0.2277	0.0259	03:51:00	96.25
12/5	0.2267	0.0242	03:52:30	96.88
12/6	0.2361	0.0216	03:51:30	96.46
12/7	0.2335	0.0217	03:52:00	96.67
12/8	0.4167	0.0094	03:47:00	94.58
12/9	1.134	0.0049	02:57:00	73.75
12/10	1.2106	0.0055	03:10:30	79.38
12/11	0.5092	0.0125	03:46:30	94.38
12/12	0.5881	0.0064	03:41:00	92.08
12/13	0.2403	0.0198	03:55:30	98.13
12/14	0.2523	0.0154	03:54:30	97.71
12/15	0.7621	0.0077	03:33:30	88.96
12/16	0.2498	0.0337	03:56:00	98.33
12/17	0.2457	0.0267	03:55:00	97.92
12/18	0.2482	0.02	03:54:30	97.71
12/19	0.2654	0.0191	03:53:30	97.29
12/20	0.2404	0.02	03:55:00	97.92
12/21	0.2456	0.0207	03:55:00	97.92
12/22	0.2472	0.0239	03:55:30	98.13
12/23	0.2657	0.0194	03:55:00	97.92
12/24	0.2519	0.0189	03:55:30	98.13
12/25	0.2612	0.021	03:52:00	96.67
12/26	0.2605	0.0194	03:54:30	97.71
12/27	0.276	0.0198	03:53:30	97.29
12/28	0.3145	0.0246	03:52:00	96.67
12/29	0.2462	0.0232	03:55:30	98.13
12/30	0.4494	0.0118	03:48:00	95
12/31	0.4063	0.0067	03:50:30	96.04
12/32	0.4366	0.0118	03:49:00	95.42
12/33	0.2874	0.0213	03:54:00	97.5
12/34	0.2773	0.0184	03:54:30	97.71
12/35	1.0807	0.0056	02:54:30	72.71
12/36	1.7013	0.0041	02:23:00	59.58
12/37	2.1943	0.0028	02:17:00	57.08
12/38	0.571	0.0067	03:43:30	93.13
12/39	1.1001	0.0039	03:20:00	83.33
12/40	0.7081	0.0043	03:35:30	89.79
12/41	1.0646	0.0033	03:27:00	86.25
12/42	0.2773	0.0153	03:54:00	97.5
12/43	0.383	0.0114	03:48:30	95.21
12/44	0.4654	0.0074	03:47:00	94.58
12/45	0.3178	0.0127	03:52:00	96.67
12/46	1.1467	0.0031	03:24:30	85.21
12/47	1.1391	0.0043	03:24:00	85
12/48	2.0662	0.0043	02:19:30	58.13
12/49	1.1547	0.01	03:14:00	80.83
12/50	0.5707	0.0073	01:01:00	25.42

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
13/1	1.1021	0.003	03:16:30	81.88
13/2	0.8516	0.0052	03:20:30	83.54
13/3	0.9491	0.0046	03:20:00	83.33
13/4	1.2487	0.0035	02:52:00	71.67
13/5	1.2648	0.004	02:59:00	74.58
13/6	1.1514	0.0056	03:01:30	75.63
13/7	1.3687	0.0038	02:57:30	73.96
13/8	1.819	0.0035	01:54:30	47.71
13/9	2.1403	0.0026	02:15:00	56.25
13/10	0.7075	0.0073	03:32:30	88.54
13/11	1.5557	0.0167	01:04:30	26.88
13/12	2.2864	0.0025	01:42:00	42.5
13/13	1.0823	0.0026	03:10:30	79.38
13/14	1.3265	0.0038	03:00:00	75
13/15	2.0997	0.0025	02:10:30	54.38
13/16	1.6539	0.0018	02:27:00	61.25
13/17	1.0736	0.0049	03:01:30	75.63
13/18	1.5169	0.0029	02:52:00	71.67
13/19	2.0835	0.0037	01:43:30	43.13
13/20	0.5657	0.0071	03:41:30	92.29
13/21	0.3517	0.0197	03:47:30	94.79
13/22	0.4536	0.0099	03:46:00	94.17
13/23	1.4084	0.0041	01:53:30	47.29
13/24	1.6039	0.0031	01:38:00	40.83
13/25	1.2089	0.0059	01:58:30	49.38
13/26	1.5081	0.0027	02:53:30	72.29
13/27	1.7692	0.0038	01:33:00	38.75
13/28	1.6899	0.0037	01:04:30	26.88
13/29	1.3256	0.0039	03:03:00	76.25
13/30	1.6428	0.0051	02:18:00	57.5
13/31	0.4135	0.0102	03:45:30	93.96
13/32	1.4003	0.0074	02:05:00	52.08
13/33	0.972	0.0046	03:23:30	84.79
13/34	0.4957	0.0095	03:40:00	91.67
13/35	0.8246	0.0046	03:28:00	86.67
13/36	1.218	0.0035	03:11:00	79.58
13/37	2.2185	0.0046	02:41:00	67.08
13/38	1.0504	0.0036	03:19:30	83.13
13/39	1.8207	0.0022	01:48:00	45
13/40	2.363	0.0029	02:15:30	56.46
13/41	1.0416	0.0045	03:13:00	80.42
13/42	0.6447	0.0075	03:35:00	89.58
13/43	1.0828	0.0026	03:09:00	78.75
13/44	0.8631	0.0042	03:31:30	88.13
13/45	1.1112	0.0039	03:19:00	82.92
13/46	0.3931	0.0135	03:43:00	92.92
13/47	0.9014	0.005	03:25:00	85.42
13/48	1.6894	0.0027	02:42:30	67.71
13/49	1.0371	0.0047	03:12:00	80
13/50	0.3356	0.0095	03:47:00	94.58

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
14/1	0.3047	0.0171	03:50:30	96.04
14/2	1.226	0.0041	03:09:30	78.96
14/3	0.3055	0.0184	03:51:30	96.46
14/4	0.3623	0.0168	03:51:00	96.25
14/5	0.3834	0.0143	03:48:30	95.21
14/6	0.8295	0.0064	03:36:00	90
14/7	1.1885	0.006	03:11:30	79.79
14/8	1.335	0.0044	03:16:30	81.88
14/9	2.2343	0.0024	01:23:30	34.79
14/10	1.398	0.0048	03:09:00	78.75
14/11	1.4536	0.0037	03:14:00	80.83
14/12	2.5753	0.0028	02:11:30	54.79
14/13	1.4339	0.0095	01:51:00	46.25
14/14	1.5872	0.0043	02:05:30	52.29
14/15	1.6939	0.0079	01:19:00	32.92
14/16	1.5148	0.0031	03:14:30	81.04
14/17	2.0632	0.0039	02:20:00	58.33
14/18	1.1387	0.004	03:20:00	83.33
14/19	2.178	0.002	01:13:00	30.42
14/20	0.4117	0.0099	03:43:30	93.13
14/21	0.395	0.0124	03:46:00	94.17
14/22	0.4402	0.0118	03:42:30	92.71
14/23	0.5486	0.009	03:38:00	90.83
14/24	0.6357	0.007	03:35:00	89.58
14/25	0.6469	0.0047	03:30:30	87.71
14/26	0.8976	0.004	03:19:00	82.92
14/27	0.9027	0.0043	03:21:30	83.96
14/28	2.4331	0.0071	02:29:30	62.29
14/29	1.7567	0.0022	02:42:00	67.5
14/30	0.8415	0.0031	03:21:30	83.96
14/31	1.2218	0.003	03:09:30	78.96
14/32	1.2	0.0064	01:58:00	49.17
14/33	1.1104	0.0041	03:17:00	82.08
14/34	0.7345	0.0042	03:34:00	89.17
14/35	0.8923	0.0048	03:34:30	89.38
14/36	1.8246	0.0104	01:52:30	46.88
14/37	1.8318	0.003	02:02:00	50.83
14/38	0.9437	0.0033	03:27:30	86.46
14/39	0.5933	0.0085	03:40:00	91.67
14/40	0.4109	0.0111	03:44:00	93.33
14/41	0.6084	0.0063	03:37:30	90.63
14/42	0.6431	0.0075	03:34:30	89.38
14/43	0.8031	0.0059	03:39:00	91.25
14/44	2.0337	0.0057	02:15:30	56.46
14/45	1.3721	0.003	03:11:00	79.58
14/46	0.5212	0.0089	03:42:30	92.71
14/47	1.3277	0.0025	03:04:00	76.67
14/48	0.8958	0.006	03:34:00	89.17
14/49	1.5326	0.0031	02:59:00	74.58
14/50	0.5326	0.0082	03:41:00	92.08

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
15/1	0.7088	0.0053	03:34:00	89.17
15/2	1.1921	0.0056	03:19:00	82.92
15/3	0.5583	0.0077	03:42:30	92.71
15/4	1.3136	0.0034	03:17:30	82.29
15/5	1.1109	0.0038	03:23:30	84.79
15/6	1.2587	0.0055	03:02:00	75.83
15/7	0.4738	0.0078	03:47:30	94.79
15/8	0.3943	0.0159	03:50:30	96.04
15/9	0.8172	0.0043	03:37:00	90.42
15/10	0.9327	0.0067	03:34:30	89.38
15/11	1.6567	0.0036	02:35:00	64.58
15/12	0.5976	0.0076	03:46:30	94.38
15/13	1.4576	0.0047	03:10:30	79.38
15/14	2.082	0.0032	01:32:00	38.33
15/15	1.1718	0.0053	03:19:30	83.13
15/16	1.0858	0.0039	03:30:30	87.71
15/17	1.2856	0.0044	02:52:30	71.88
15/18	1.0059	0.0043	03:34:00	89.17
15/19	2.1522	0.0036	02:32:30	63.54
15/20	0.5936	0.0101	03:40:00	91.67
15/21	1.2813	0.0041	03:13:00	80.42
15/22	0.9596	0.0027	03:31:30	88.13
15/23	1.0436	0.0038	03:25:00	85.42
15/24	0.9118	0.0042	03:28:30	86.88
15/25	0.5033	0.009	03:42:30	92.71
15/26	0.7794	0.0058	03:33:00	88.75
15/27	1.0505	0.0063	03:25:30	85.63
15/28	1.2505	0.0031	03:07:30	78.13
15/29	1.4469	0.0025	02:59:30	74.79
15/30	1.1627	0.0035	03:08:00	78.33
15/31	1.5042	0.0049	02:52:00	71.67
15/32	2.0401	0.0058	02:51:30	71.46
15/33	0.9704	0.0072	03:23:30	84.79
15/34	1.773	0.0034	02:26:00	60.83
15/35	1.5597	0.0037	02:54:30	72.71
15/36	2.1714	0.0031	03:19:00	82.92
15/37	0.8779	0.0045	03:32:30	88.54
15/38	0.6885	0.0084	03:36:00	90
15/39	0.6524	0.0073	03:38:00	90.83
15/40	0.7929	0.0052	03:37:30	90.63
15/41	0.6121	0.008	03:35:30	89.79
15/42	1.4369	0.0041	02:48:30	70.21
15/43	0.7634	0.0057	03:38:30	91.04
15/44	1.013	0.007	03:33:30	88.96
15/45	0.8608	0.0047	03:34:30	89.38
15/46	1.0212	0.0034	03:15:00	81.25
15/47	1.0891	0.0026	03:02:30	76.04
15/48	1.4672	0.0051	02:48:30	70.21
15/49	1.2272	0.003	03:10:30	79.38
15/50	1.0823	0.0074	03:28:00	86.67

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
16/1	0.2831	0.0222	03:51:30	96.46
16/2	0.3135	0.0187	03:50:00	95.83
16/3	0.306	0.0175	03:53:00	97.08
16/4	0.9744	0.0045	03:29:00	87.08
16/5	1.1614	0.0039	03:23:30	84.79
16/6	0.8071	0.0053	03:35:30	89.79
16/7	2.1233	0.0045	01:57:00	48.75
16/8	0.3873	0.0109	03:54:00	97.5
16/9	1.1667	0.0035	03:22:00	84.17
16/10	1.3195	0.0066	03:06:00	77.5
16/11	1.4666	0.007	02:48:30	70.21
16/12	2.5108	0.0025	01:53:30	47.29
16/13	1.184	0.0038	03:19:00	82.92
16/14	1.751	0.0055	02:03:30	51.46
16/15	0.5427	0.0072	03:48:00	95
16/16	1.4247	0.0035	03:33:00	88.75
16/17	1.6978	0.0026	01:32:30	38.54
16/18	0.8632	0.0057	03:44:30	93.54
16/19	1.6716	0.0028	03:18:30	82.71
16/20	0.3282	0.0126	03:52:30	96.88
16/21	0.372	0.0158	03:51:00	96.25
16/22	0.9393	0.0048	03:32:30	88.54
16/23	1.1179	0.0028	03:30:00	87.5
16/24	1.9943	0.0034	01:50:30	46.04
16/25	0.8476	0.0053	03:35:30	89.79
16/26	0.8403	0.0054	03:34:00	89.17
16/27	0.7505	0.0034	03:38:00	90.83
16/28	1.0542	0.0045	03:24:30	85.21
16/29	0.9431	0.0029	03:20:00	83.33
16/30	1.2353	0.0049	03:18:00	82.5
16/31	1.6931	0.004	01:49:30	45.63
16/32	1.1105	0.004	03:13:30	80.63
16/33	0.4519	0.0118	03:54:30	97.71
16/34	0.5942	0.0072	03:44:00	93.33
16/35	0.6693	0.0051	03:42:30	92.71
16/36	0.6733	0.0067	03:46:00	94.17
16/37	1.3096	0.0047	03:02:00	75.83
16/38	0.5296	0.0081	03:47:00	94.58
16/39	0.9791	0.0042	03:32:00	88.33
16/40	0.7207	0.0062	03:47:00	94.58
16/41	0.6414	0.0065	03:44:00	93.33
16/42	0.5259	0.0071	03:51:30	96.46
16/43	0.5169	0.0091	03:45:00	93.75
16/44	1.6705	0.0018	02:43:30	68.13
16/45	0.87	0.0049	03:37:00	90.42
16/46	0.9144	0.0055	03:31:00	87.92
16/47	0.836	0.0051	03:36:30	90.21
16/48	1.5714	0.0037	03:11:30	79.79
16/49	1.4781	0.0066	03:15:00	81.25
16/50	0.3403	0.0093	03:56:30	98.54

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
17/1	0.3058	0.0205	03:38:00	90.83
17/2	0.3154	0.015	03:33:30	88.96
17/3	0.3141	0.0136	03:34:30	89.38
17/4	1.1676	0.0058	01:30:00	37.5
17/5	1.2188	0.0034	03:10:00	79.17
17/6	0.3461	0.0158	03:38:30	91.04
17/7	1.0194	0.007	02:24:00	60
17/8	0.3972	0.0104	03:38:00	90.83
17/9	2.0195	0.0035	01:02:30	26.04
17/10	2.0451	0.0036	01:07:30	28.13
17/11	0.549	0.0083	03:33:00	88.75
17/12	0.5866	0.0053	03:34:30	89.38
17/13	1.5353	0.0048	03:06:00	77.5
17/14	1.3464	0.006	01:24:30	35.21
17/15	1.6577	0.0037	01:33:00	38.75
17/16	2.0566	0.0039	01:56:30	48.54
17/17	2.4007	0.0034	01:22:00	34.17
17/18	1.7145	0.0027	01:13:00	30.42
17/19	1.5178	0.0061	02:25:00	60.42
17/20	1.543	0.0038	03:08:00	78.33
17/21	0.9763	0.0053	01:36:00	40
17/22	1.616	0.0053	02:35:00	64.58
17/23	1.1572	0.0036	03:08:00	78.33
17/24	0.5871	0.0086	03:28:30	86.88
17/25	0.6052	0.0092	03:27:00	86.25
17/26	1.1375	0.0041	03:13:00	80.42
17/27	1.2938	0.0031	01:06:30	27.71
17/28	2.0557	0.0079	01:54:30	47.71
17/29	0.7574	0.0051	03:17:30	82.29
17/30	0.7441	0.0068	03:28:00	86.67
17/31	0.5562	0.0088	03:28:00	86.67
17/32	1.7477	0.0035	02:27:00	61.25
17/33	2.22	0.0034	01:26:30	36.04
17/34	1.4271	0.006	01:28:00	36.67
17/35	1.434	0.0035	01:48:30	45.21
17/36	1.4458	0.0022	02:53:00	72.08
17/37	1.5563	0.0031	02:57:00	73.75
17/38	0.5114	0.0089	03:38:30	91.04
17/39	0.5387	0.0053	03:30:00	87.5
17/40	0.5592	0.009	03:26:30	86.04
17/41	0.597	0.0067	03:25:30	85.63
17/42	0.7194	0.0049	03:30:00	87.5
17/43	0.8656	0.0052	03:22:00	84.17
17/44	0.6667	0.0076	03:31:30	88.13
17/45	0.794	0.0052	03:25:30	85.63
17/46	1.4368	0.0032	01:44:30	43.54
17/47	1.1973	0.0047	02:57:30	73.96
17/48	1.2591	0.0045	03:12:30	80.21
17/49	2.0206	0.0031	02:41:00	67.08
17/50	0.3733	0.0136	03:42:00	92.5

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
18/1	0.738	0.0046	03:36:00	90
18/2	1.8353	0.0059	01:36:00	40
18/3	0.6493	0.0052	03:34:30	89.38
18/4	1.6902	0.0031	01:47:30	44.79
18/5	2.1717	0.0031	02:38:30	66.04
18/6	1.836	0.0033	02:42:30	67.71
18/7	1.0791	0.004	03:23:00	84.58
18/8	0.9342	0.004	03:27:30	86.46
18/9	1.9301	0.0059	01:34:00	39.17
18/10	1.0873	0.004	02:45:30	68.96
18/11	0.9548	0.0052	02:37:00	65.42
18/12	0.5913	0.0079	03:02:00	75.83
18/13	1.8774	0.0047	02:30:30	62.71
18/14	1.1959	0.0058	02:23:00	59.58
18/15	0.8679	0.0043	02:56:00	73.33
18/16	1.053	0.0037	02:44:00	68.33
18/17	2.6438	0.0024	01:18:30	32.71
18/18	1.6527	0.0051	02:35:30	64.79
18/19	1.496	0.0038	02:19:30	58.13
18/20	1.4304	0.0069	01:53:00	47.08
18/21	0.8124	0.0082	02:33:00	63.75
18/22	0.4611	0.0078	02:45:00	68.75
18/23	0.7681	0.0074	02:40:30	66.88
18/24	0.8527	0.0052	02:37:00	65.42
18/25	1.3656	0.0047	02:22:30	59.38
18/26	1.2216	0.0038	02:27:00	61.25
18/27	0.9508	0.0027	02:31:00	62.92
18/28	0.9337	0.0043	02:33:00	63.75
18/29	0.5926	0.0073	02:45:30	68.96
18/30	0.8331	0.0045	02:36:00	65
18/31	1.0429	0.004	02:15:30	56.46
18/32	1.5966	0.0044	01:53:30	47.29
18/33	1.4154	0.0034	01:16:00	31.67
18/34	2.2531	0.0029	02:20:00	58.33
18/35	1.5525	0.0035	02:54:00	72.5
18/36	1.6162	0.0037	02:47:00	69.58
18/37	1.2487	0.0029	02:26:00	60.83
18/38	1.1615	0.004	02:16:30	56.88
18/39	0.6095	0.0089	02:38:00	65.83
18/40	0.8069	0.0063	02:30:00	62.5
18/41	2.4816	0.005	01:11:00	29.58
18/42	1.1335	0.0079	02:24:30	60.21
18/43	0.7372	0.0067	02:36:30	65.21
18/44	0.8401	0.0058	02:28:30	61.88
18/45	1.8981	0.0044	02:00:30	50.21
18/46	0.7196	0.007	02:24:30	60.21
18/47	0.957	0.0045	02:19:00	57.92
18/48	1.4268	0.0089	01:56:30	48.54
18/49	1.1675	0.004	02:08:00	53.33
18/50	1.2687	0.0035	01:58:00	49.17

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
19/1	0.5259	0.0076	03:36:00	90
19/2	0.8992	0.0043	03:14:00	80.83
19/3	0.6926	0.0068	03:34:00	89.17
19/4	0.7687	0.0052	03:32:30	88.54
19/5	1.1437	0.0085	03:17:00	82.08
19/6	0.873	0.0047	03:28:00	86.67
19/7	1.41	0.004	02:13:30	55.63
19/8	1.8322	0.0025	02:48:30	70.21
19/9	1.7195	0.0035	01:32:30	38.54
19/10	1.1589	0.003	03:16:00	81.67
19/11	2.0943	0.0045	01:49:00	45.42
19/12	1.9509	0.0041	02:51:30	71.46
19/13	1.7484	0.0039	03:06:00	77.5
19/14	1.9215	0.0045	02:55:00	72.92
19/15	2.0855	0.0021	02:30:30	62.71
19/16	1.936	0.0047	01:27:00	36.25
19/17	1.4406	0.0029	01:51:30	46.46
19/18	1.0699	0.0035	03:22:00	84.17
19/19	1.6141	0.0191	02:33:00	63.75
19/20	1.064	0.0027	03:15:00	81.25
19/21	0.5862	0.0057	03:37:30	90.63
19/22	1.4439	0.0046	01:19:30	33.13
19/23	0.7309	0.0054	03:31:30	88.13
19/24	1.077	0.0034	03:11:30	79.79
19/25	1.0155	0.0029	03:17:00	82.08
19/26	1.1245	0.0052	03:09:00	78.75
19/27	1.2925	0.0027	03:00:30	75.21
19/28	1.4172	0.0025	02:17:00	57.08
19/29	1.0376	0.0034	03:09:30	78.96
19/30	1.0252	0.0035	03:21:00	83.75
19/31	2.4458	0.0018	02:01:00	50.42
19/32	1.6915	0.0039	01:31:30	38.13
19/33	1.1885	0.0033	02:04:00	51.67
19/34	0.9596	0.0039	03:19:30	83.13
19/35	1.6495	0.0023	01:41:00	42.08
19/36	1.8739	0.0033	01:51:00	46.25
19/37	2.5442	0.0055	02:26:30	61.04
19/38	1.2633	0.0031	03:16:30	81.88
19/39	1.766	0.0032	01:38:30	41.04
19/40	2.2619	0.0022	02:01:00	50.42
19/41	1.6698	0.0027	03:04:30	76.88
19/42	0.9562	0.0036	03:20:00	83.33
19/43	1.0777	0.018	02:02:30	51.04
19/44	1.3137	0.004	02:33:00	63.75
19/45	2.0856	0.0076	02:46:00	69.17
19/46	1.3957	0.0048	01:39:30	41.46
19/47	2.053	0.0017	02:15:30	56.46
19/48	1.7656	0.0034	02:49:00	70.42
19/49	0.7636	0.0044	03:34:30	89.38
19/50	1.6262	0.0042	01:38:30	41.04

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
20/1	0.3567	0.0159	03:41:00	92.08
20/2	0.8463	0.0043	03:12:30	80.21
20/3	1.2468	0.0051	03:08:30	78.54
20/4	0.9351	0.0049	03:23:30	84.79
20/5	1.103	0.0043	03:15:00	81.25
20/6	1.4528	0.0038	03:03:00	76.25
20/7	1.6975	0.0047	02:49:00	70.42
20/8	1.2005	0.0025	03:16:00	81.67
20/9	1.134	0.0036	03:12:00	80
20/10	1.7746	0.003	02:37:30	65.63
20/11	1.3815	0.0081	01:38:30	41.04
20/12	1.4762	0.0037	01:36:00	40
20/13	0.6121	0.0085	03:36:00	90
20/14	1.6375	0.0053	03:03:00	76.25
20/15	1.1413	0.0523	03:18:00	82.5
20/16	1.8324	0.0041	03:02:00	75.83
20/17	2.0441	0.0054	02:37:00	65.42
20/18	1.2343	0.0033	03:15:30	81.46
20/19	1.8091	0.0024	01:37:00	40.42
20/20	1.6678	0.0054	02:49:30	70.63
20/21	0.8103	0.0044	03:26:00	85.83
20/22	0.7691	0.0048	03:26:30	86.04
20/23	1.0531	0.0033	03:17:00	82.08
20/24	1.0488	0.0041	03:16:30	81.88
20/25	0.6909	0.0037	03:27:00	86.25
20/26	0.4822	0.0066	03:42:00	92.5
20/27	0.5458	0.0071	03:36:00	90
20/28	0.8454	0.0088	03:19:00	82.92
20/29	0.9721	0.0054	03:16:00	81.67
20/30	1.6403	0.0027	02:42:30	67.71
20/31	0.9412	0.0033	03:19:00	82.92
20/32	1.5656	0.0034	02:35:30	64.79
20/33	1.9241	0.007	02:22:30	59.38
20/34	1.5217	0.0042	02:49:00	70.42
20/35	1.635	0.0037	01:43:00	42.92
20/36	1.2031	0.0041	02:26:30	61.04
20/37	1.5903	0.003	02:47:00	69.58
20/38	1.7655	0.0051	02:26:30	61.04
20/39	0.9607	0.0035	03:24:00	85
20/40	1.5981	0.0029	02:38:30	66.04
20/41	1.4476	0.0028	01:34:30	39.38
20/42	1.7475	0.0049	02:43:30	68.13
20/43	1.532	0.0031	01:45:00	43.75
20/44	1.1752	0.0026	03:11:30	79.79
20/45	1.2874	0.0024	03:03:30	76.46
20/46	0.8201	0.0046	03:25:00	85.42
20/47	1.1302	0.0035	03:14:00	80.83
20/48	1.6312	0.0047	02:37:00	65.42
20/49	0.727	0.006	03:32:30	88.54
20/50	0.6658	0.0063	03:35:30	89.79

Bateria/Medida	Resistência interna	Capacitância interna	Tempo de descarga	SOH
21/1	1.4626	0.0043	03:06:30	77.71
21/2	0.3528	0.0136	03:41:00	92.08
21/3	0.3248	0.0158	03:43:30	93.13
21/4	1.5984	0.003	03:13:30	80.63
21/5	1.6514	0.004	02:47:30	69.79
21/6	2.0088	0.003	02:02:00	50.83
21/7	1.8959	0.0042	01:17:30	32.29
21/8	1.3641	0.003	03:11:00	79.58
21/9	0.3824	0.0104	03:42:00	92.5
21/10	0.8491	0.0045	03:31:00	87.92
21/11	0.5728	0.0011	03:41:30	92.29
21/12	1.0911	0.0025	03:25:00	85.42
21/13	1.2027	0.0158	03:12:00	80
21/14	1.5176	0.0028	02:27:00	61.25
21/15	1.6194	0.0037	02:21:30	58.96
21/16	2.3452	0.0026	02:42:00	67.5
21/17	1.7641	0.0046	01:46:30	44.38
21/18	1.0838	0.0058	03:15:00	81.25
21/19	1.6191	0.004	01:34:30	39.38
21/20	1.5538	0.0039	02:58:30	74.38
21/21	1.3434	0.0085	01:22:30	34.38
21/22	1.8133	0.0056	02:59:00	74.58
21/23	2.6967	0.003	02:21:30	58.96
21/24	1.5547	0.0059	02:51:30	71.46
21/25	0.6078	0.0069	03:26:30	86.04
21/26	0.8886	0.0046	03:18:30	82.71
21/27	0.8398	0.0044	03:25:00	85.42
21/28	1.1474	0.0022	03:06:30	77.71
21/29	1.6736	0.006	03:00:00	75
21/30	0.954	0.0059	03:22:30	84.38
21/31	1.0079	0.0025	03:15:30	81.46
21/32	1.3873	0.0052	02:58:00	74.17
21/33	1.3936	0.0091	01:16:00	31.67
21/34	1.2979	0.003	03:00:30	75.21
21/35	1.4504	0.003	02:20:00	58.33
21/36	1.6386	0.0038	02:31:30	63.13
21/37	2.099	0.0026	03:15:30	81.46
21/38	1.2252	0.0031	03:12:30	80.21
21/39	2.1256	0.003	01:21:00	33.75
21/40	1.0136	0.0032	03:22:00	84.17
21/41	1.234	0.0046	03:07:30	78.13
21/42	0.9497	0.0046	03:19:30	83.13
21/43	1.9032	0.0023	01:14:00	30.83
21/44	0.8812	0.0046	03:30:00	87.5
21/45	0.6761	0.0059	03:28:30	86.88
21/46	0.903	0.0051	03:26:00	85.83
21/47	0.9795	0.0042	03:25:00	85.42
21/48	1.2161	0.0061	01:56:00	48.33
21/49	0.4123	0.0123	03:47:30	94.79
21/50	0.3617	0.0109	03:43:30	93.13

Fonte: Autor

ANEXOS

**ANEXO A - Extratos do datasheet da bateria Expower (PN: 483757)
de 1000mAh**

4.Specification

NO.	Item		Specification	
4.1	Min capacity		1000 mAh	0.2C Discharge
4.2	Initial Impedance		≤180mΩ	
4.3	Weight		Approx: 12g	
4.4	Nominal voltage Fully charge voltage(FC) Fully discharge voltage(FD)		3.7 V 4.2 V 3.0 V	
4.5	Standard charge current		0.5 C	
4.6	Standard charging method		0.5C CC（constant current）charge to FC, then CV(constant voltage FC)charge till charge current decline to ≤0.01C	
4.7	Charging time		Standard Charging	
4.8	Max. charge current		Constant Current 1C Constant Voltage FC 0.01 C cut-off	
4.9	Max. discharge current		Constant current 1C end voltage FD	
4.10	Standard Discharge Current		Constant current 0.2 C end voltage FD	
4.11	Charge cut-off voltage		Ref. 8.1 VDET1	
4.12	Discharge cut-off Voltage		Ref. 8.1 VDET2	
4.13	Storage temperature	-20°C~60°C	≤1 month	Percentage of recoverable capacity no less than 80% of the initial capacities
		-20°C~45°C	≤3 month	
		-20°C~28°C	≤1 year	
4.14	Recoverable capacity		Constant current 0.5C charge to FC, then constant voltage FC charge to current declines to 0.01C, rest for 10min, constant current 0.5C discharge to FD, rest for 10min.Repeat above steps 3 times, recording the maximum capacity	
4.15	Storage Humidity		≤75% RH	
4.16	Appearance		Without distortion and leakage	
4.17	Standard testing condition		Temperature: 23±5°C Humidity : ≤75%RH	

8. Protection circuit

PCM Standard

Symbol	Name	MIN.	Typical.	MAX.	Unit
VDET1	Over-Charge detect voltage	4.25	4.28	4.31	V
VDET2	Over-discharge detect voltage	2.9	3.0	3.1	V
IEC	Excess Current threshold	2		6	A
IDD	Supply current	--	--	7	μ A
RD	Internal resistance in normal operation	--	--	65	m Ω
RWV	Reverse withstand voltage: reverse voltage adding to pack caused by load circuit: Max.12				V
RWI	Reverse current adding to pack caused by load circuit: Max.5				A

Schematic diagram

***ANEXO B - Extratos do datasheet da bateria Expower (PN: 483759)
de 1000mAh***

SPECIFICATION

No.	Item	Characteristics	Remarks
3.1	Nominal Capacity	Minimum:1000mAh Typical:1000mAh	Fully charged @1C to 4.2V for 2.5 hrs, then discharge to 3.0V @ 0.2C.
3.2	Nominal Voltage	3.7V	
3.3	Charging Cut-off Voltage	4.2V	
3.4	Discharge Cut-off Voltage	3.0V	
3.5	Maximum Constant	1000mA 1.0C	
3.6	Maximum Continuous	2000mA 2.0C	
3.7	Operating Temperature	Charge 0 ~ 45°C Discharge -20 60°C	
3.8	Storage Temperature	-20 45°C for 1Month -20 35°C for 6Months	
3.9	Weight	19.3g	Approximate value
3.10	Storage Voltage	3.80-3.90V	
3.11	Environmental request	RoHS	If the materials of the product and packaging accord with RoHS standard there will be a RoHS Id on the box.

Required Protective Functions

To ensure safety, the cells need to be assembled with PTC and protective circuitry to prevent abusive situations occur such as over charge and over discharge or over current. The charger and protective circuitry should be consistent with the requirements listed below:

No	Device	Items	Requirements
1	Charger	Charge termination voltage	4.200±0.049V
2	Protective Circuitry (For reference only)	Overcharge detection voltage	4.275±0.025V
3		Overcharge release voltage	4.175±0.050V
4		Discharge termination voltage	3.00±0.10V
5		Over discharge detection voltage	3.0±0.08V
6		Over discharge release voltage	3.0±0.10V
7		Over discharge detection value	2.7±0.2A
8		NTC	10±5%K

**ANEXO C - Extratos do datasheet da bateria HCT (PN:
HCT053759P) de 1150mAh**

electrical characteristics			
NO.	ITEM	SPECIFICATION	REMARK
1	Cell	053759P*1	Li-polymer
2	Rated Capacity	1150mAh	
3	Internal resistance	<190mΩ	
4	Cycle Life	>300	
5	Nominal Voltage	3.7V~3.9V	
6	Max. Charge Voltage	4.2V	
7	Discharge Cut-off Voltage	2.75V	
8	Over-charge Protection	4.28V±0.025V	
9	Over-discharge Protection	3.0V±0.05V	
10	Supply current	<6uA	
13	Operating temperature	Charging Temperature: 0~+45℃	
		Discharging Temperature: -20~+60℃	
14	Storage temperature	1 month: -20 ~ 60℃ 3 month : -20 ~ 45℃	
		1 year : -20 ~ 25℃	

Pin 1 = GND
Pin 2 = Resistance 10k (Thermal protection)
Pin 3 = VCC

ANEXO D - Extratos do datasheet do LPC1778

- System:
 - ARM Cortex-M3 processor, running at frequencies of up to 120 MHz. A Memory Protection Unit (MPU) supporting eight regions is included.
 - ARM Cortex-M3 built-in Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC).
 - Multilayer AHB matrix interconnect provides a separate bus for each AHB master. AHB masters include the CPU, and General Purpose DMA controller. This interconnect provides communication with no arbitration delays unless two masters attempt to access the same slave at the same time.
 - Split APB bus allows for higher throughput with fewer stalls between the CPU and DMA. A single level of write buffering allows the CPU to continue without waiting for completion of APB writes if the APB was not already busy.
 - Cortex-M3 system tick timer, including an external clock input option.
 - Standard JTAG test/debug interface as well as Serial Wire Debug and Serial
- WireTrace Port options.
 - Emulation trace module supports real-time trace.
 - Boundary scan for simplified board testing.
 - Non-maskable Interrupt (NMI) input.
- Memory:
 - 512 kB on-chip flash program memory with In-System Programming (ISP) and In-Application Programming (IAP) capabilities. The combination of an enhanced flash memory accelerator and location of the flash memory on the CPU local code/data bus provides high code performance from flash.
 - 96 kB on-chip SRAM includes:
 - 64 kB of SRAM on the CPU with local code/data bus for high-performance CPU access. Two 16 kB SRAM blocks with separate access paths for higher throughput. These SRAM blocks may be used for DMA memory as well as for general purpose instruction and data storage.
 - 4032 byte on-chip EEPROM.
- LCD controller, supporting both Super-Twisted Nematic (STN) and Thin-Film Transistors (TFT) displays.
 - Dedicated DMA controller.

- Selectable display resolution (up to 1024 · 768 pixels).
- Supports up to 24-bit true-color mode.
- External Memory Controller (EMC) provides support for asynchronous static memory devices such as RAM, ROM and flash, as well as dynamic memories such as single data rate SDRAM.
- Eight channel General Purpose DMA controller (GPDMA) on the AHB multilayer matrix that can be used with the SSP, I2S, UART, CRC engine, Analog-to-Digital and Digital-to-Analog converter peripherals, timer match signals, GPIO, and for memory-to-memory transfers.
- Serial interfaces:
 - Ethernet MAC with MII/RMII interface and associated DMA controller. These functions reside on an independent AHB.
 - USB 2.0 full-speed dual port device/host/OTG controller with on-chip PHY and associated DMA controller.
 - Five UARTs with fractional baud rate generation, internal FIFO, DMA support, and RS-485/EIA-485 support. One UART (UART1) has full modem control I/O, and one UART (USART4) supports IrDA, synchronous mode, and a smart card mode conforming to ISO7816-3.
 - Three SSP controllers with FIFO and multi-protocol capabilities. The SSP interfaces can be used with the GPDMA controller.
 - Three enhanced I2C-bus interfaces, one with a true open-drain output supporting the full I2C-bus specification and Fast-mode Plus with data rates of 1 Mbit/s, two with standard port pins. Enhancements include multiple address recognition and monitor mode.
 - I2S (Inter-IC Sound) interface for digital audio input or output. It can be used with the GPDMA.
 - CAN controller with two channels.
- Digital peripherals:
 - SD/MMC memory card interface.
 - Up to 165 General Purpose I/O (GPIO) pins depending on the packaging, with configurable pull-up/down resistors, open-drain mode, and repeater mode. All GPIOs are located on an AHB bus for fast access and support Cortex-M3 bit-banding. GPIOs can be accessed by the General Purpose

DMA Controller. Any pin of ports 0 and 2 can be used to generate an interrupt.

- Two external interrupt inputs configurable as edge/level sensitive. All pins on port 0 and port 2 can be used as edge sensitive interrupt sources.
- Four general purpose timers/counters, with a total of eight capture inputs and ten compare outputs. Each timer block has an external count input. Specific timer events can be selected to generate DMA requests.
- Quadrature encoder interface that can monitor one external quadrature encoder.
- Two standard PWM/timer blocks with external count input option.
- One motor control PWM with support for three-phase motor control.
- Real-Time Clock (RTC) with a separate power domain. The RTC is clocked by a dedicated RTC oscillator. The RTC block includes 20 bytes of battery-powered backup registers, allowing system status to be stored when the rest of the chip is powered off. Battery power can be supplied from a standard 3 V lithium button cell.
- The RTC will continue working when the battery voltage drops to as low as 2.1 V.
- An RTC interrupt can wake up the CPU from any reduced power mode.
- Event Recorder that can capture the clock value when an event occurs on any of three inputs. The event identification and the time it occurred are stored in registers. The Event Recorder is located in the RTC power domain and can therefore operate as long as there is RTC power.
- Windowed Watchdog Timer (WWDT). Windowed operation, dedicated internal oscillator, watchdog warning interrupt, and safety features.
- CRC Engine block can calculate a CRC on supplied data using one of three standard polynomials. The CRC engine can be used in conjunction with the DMA controller to generate a CRC without CPU involvement in the data transfer.

➤ Analog peripherals:

- 12-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) with input multiplexing among eight pins, conversion rates up to 400 kHz, and multiple result registers. The 12-bit ADC can be used with the GPDMA controller.

- 10-bit Digital-to-Analog Converter (DAC) with dedicated conversion timer and DMA support.
- Power control:
 - Four reduced power modes: Sleep, Deep-sleep, Power-down, and Deep power-down.
 - The Wake-up Interrupt Controller (WIC) allows the CPU to automatically wake up from any priority interrupt that can occur while the clocks are stopped in Deep-sleep, Power-down, and Deep power-down modes.
 - Processor wake-up from Power-down mode via any interrupt able to operate during Power-down mode (includes external interrupts, RTC interrupt, PORT0/2 pin interrupt, and NMI).
 - Brownout detect with separate threshold for interrupt and forced reset.
 - On-chip Power-On Reset (POR).
- Clock generation:
 - Clock output function that can reflect the main oscillator clock, IRC clock, RTC clock, CPU clock, USB clock, or the watchdog timer clock.
 - On-chip crystal oscillator with an operating range of 1 MHz to 25 MHz.
 - 12 MHz Internal RC oscillator (IRC) trimmed to 1% accuracy that can optionally be used as a system clock.
 - An on-chip PLL allows CPU operation up to the maximum CPU rate without the need for a high-frequency crystal. May be run from the main oscillator or the internal RC oscillator.
 - A second, dedicated PLL may be used for USB interface in order to allow added flexibility for the Main PLL settings.
- Versatile pin function selection feature allows many possibilities for using on-chip peripheral functions.
- Unique device serial number for identification purposes.
- Single 3.3 V power supply (2.4 V to 3.6 V). Temperature range of 40C to 85C.
- Available as LQFP208, TFBGA208, TFBGA180, and LQFP144 package.

ANEXO E - Extratos do datasheet do FS312F-P

PARAMETER	TEST CONDITIONS	SYMBOL	Min	Typ	Max	UNIT
Supply Current	VCC=3.9V	ICC		3.0	6.0	μ A
Power-Down Current	VCC=2.0V	IPD			0.1	μ A
Overcharge Protection Voltage		VOCP	4.225	4.25	4.275	V
Overcharge Release Voltage		VOCR	4.095	4.145	4.195	V
Overdischarge Protection Voltage		VODP	2.82	2.90	2.98	V
Overdischarge Release Voltage		VODR	2.92	3.00	3.08	V
Overcurrent Protection Voltage		VOIP (VOI1)	120	150	180	mV
Short Current Protection Voltage	VCC=3.6V	VSIP (VOI2)	1.00	1.35	1.70	V
Overcharge Delay Time		TOC		200	300	ms
Overdischarge Delay Time	VCC=3.6V to 2.0V	TOD		40	100	ms
Overcurrent Delay Time (1)	VCC=3.6V	TOI1		10	20	ms
Overcurrent Delay Time (2)	VCC=3.6V	TOI2		5	50	μ s
Charger Detection Threshold Voltage		VCHA	-1.2	-0.7	-0.2	V
OD Pin Output "H" Voltage		VDH	VCC-0.1	VCC-0.02		V
OD Pin Output "L" Voltage		VDL		0.1	0.5	V
OC Pin Output "H" Voltage		VCH	VCC-0.1	VCC-0.02		V
OC Pin Output "L" Voltage		VCL		0.1	0.5	V