

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**RAFAEL PERGHER**

**ESTIMATIVA DO ESTADO DE SAÚDE DE BATERIAS  
CHUMBO-ÁCIDO SELADAS APLICADAS EM SISTEMAS DE  
EMERGÊNCIA DE ELEVADORES**

**PORTO ALEGRE-RS  
2018**

**RAFAEL PERGHER**

**ESTIMATIVA DO ESTADO DE SAÚDE DE BATERIAS CHUMBO-  
ÁCIDO SELADAS APLICADAS EM SISTEMAS DE EMERGÊNCIA DE  
ELEVADORES**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado à Banca Julgadora como pré-requisito para aprovação na atividade.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Müller

**PORTO ALEGRE - RS  
2018**

**RAFAEL PERGHER**

**ESTIMATIVA DO ESTADO DE SAÚDE DE BATERIAS CHUMBO-  
ÁCIDO SELADAS APLICADAS EM SISTEMAS DE EMERGÊNCIA DE  
ELEVADORES**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de  
Controle e Automação da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, apresentado à Banca Julgadora  
como pré-requisito para aprovação na atividade.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Ivan Müller, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS – Porto  
Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Me. Chrystian Lenon Remes, UFRGS  
Mestre pela Universidade do Estado de Santa Catarina – Joinville, Brasil

Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes, UFRGS  
Doutor pela Technische Universität Dortmund – Dortmund, Alemanha

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques  
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Coordenador de curso

Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, dezembro de 2018

*“Dedico este trabalho aos meus pais que  
nunca desistiram do sonho de formar seus  
filhos”*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais, que jamais mediram esforços para permitir que eu pudesse ter uma formação no ensino superior. Agradeço ainda pela compreensão em tantos momentos de ausência, que se refletiram em meses sem visitá-los e muitas ligações não atendidas. Também se encaixa em tudo isso meu querido irmão, sem o qual eu não teria chegado até aqui, menino dedicado, atencioso e que sempre esteve ao meu lado nos momentos de dificuldade.

Um agradecimento muitíssimo especial à minha futura esposa Carolina, uma pessoa de um brilho sem igual, que nunca mediu esforços pra me ajudar em tudo o que pode, e às vezes até onde não poderia.

Aos meus colegas Carlos Miguel Tonin, Bruno Exner, João Vitor Assmann, e Thiago Companhia, pela paciência de ouvir as lamentações durante esses longos anos de UFRGS. Se consegui chegar até aqui, foi pelo incentivo de vocês, serei sempre grato por ter dividido essa etapa com vocês. Agradeço também aos meus colegas Rafael Meyer e Eduardo Brezolin, por toda a ajuda que me deram, permitindo que pudesse chegar até aqui.

Ao meu orientador, Ivan Müller, por ter acreditado no trabalho e pelo suporte e parceria ao longo da realização do mesmo.

Aos professores que realmente se dedicam em fazer com que o curso seja cada vez melhor, que ouvem os alunos e que não medem esforços para que possamos sair da universidade com a melhor formação possível.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estimar o estado de saúde de baterias chumbo-ácido seladas de 1,3 Ah, as quais são utilizadas em sistemas de emergência de elevadores. O projeto é feito por meio do levantamento do comportamento da tensão da bateria quando submetida a descarga e também por parâmetros que afetem sua vida útil. O estudo é dividido em duas partes: a primeira trata do levantamento do modelo de descarga da bateria; a segunda etapa, por sua vez, refere-se ao desenvolvimento do circuito que é conectado à bateria, tendo como função estimar e exibir o estado de saúde atual da bateria. O circuito também dispõe de um sistema de segurança a fim de garantir que a bateria esteja disponível quando ocorrer uma falha no sistema de distribuição de energia.

**Palavras-chave:** Baterias. Elevador. Segurança. Estado de saúde. Modelo de descarga.

## **ABSTRACT**

This study focuses on the state of health estimation of 1,3 Ah sealed lead acid batteries, employed in elevators' emergency systems. The project will be developed by gathering data regarding the battery's voltage behavior when subjected to discharge, as well as additional parameters that have an impact in the battery's lifespan. There are two main stages to this study: The first one encompasses the acquisition of the battery's discharge model. The second one, in turn, accounts for the development of the circuit which will be connected to the battery, aiming to estimate and then to show the battery's current state of health. Additionally the circuit must include a security system in order to ensure the availability of the battery in the moment when a failure in the power distribution system occurs.

**Keywords:** Batteries. Elevator. Safety. State of Health. Discharge model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo esquemático de descarga de uma bateria de chumbo-ácido. ....	18
Figura 2 - Variação da resistência interna em função da temperatura para um modelo de bateria de chumbo-ácido. ....	21
Figura 3 - Fluxograma <i>software</i> do microcontrolador utilizado no teste da bateria. ....	26
Figura 4 - Curva de descarga de bateria. ....	26
Figura 5 - Circuito de teste para obtenção do modelo de descarga da bateria. ....	27
Figura 6 - Gráfico do modelo do comportamento da tensão em função do tempo para as 9 baterias testadas. ....	28
Figura 7 - Esquemático do circuito de medição da bateria. ....	29
Figura 8 - Circuito projetado – Completo. ....	32
Figura 9 - Influência da profundidade de descarga associada ao número ciclos na vida da bateria. ....	33
Figura 10 - Influência da temperatura sobre a capacidade de carga da bateria. ....	35
Figura 11 - Influência da idade da bateria na sua capacidade de carga. ....	36
Figura 12 - Variação tensão logo após ligação da carga de teste. ....	38
Figura 14 - Relação entre o parâmetro $b$ e o SoH. ....	39
Figura 15 - Circuito implementado na placa de desenvolvimento. ....	41
Figura 16 - Correlação entre $SoH_{FCD}$ e SoH. ....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade de armazenamento de cada bateria. ....	28
Tabela 2 - Tabela de endereços de onde serão salvos os dados quando o sistema for desligado. .....	34
Tabela 3 - Resultados obtidos para o b.....	38
Tabela 4 - Tabela de indicação do $SoH_{MOD}$ em relação ao estado dos <i>leds</i> . ....	40
Tabela 5 - Resultados do teste gerados pelo circuito.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC – Corrente de carga

CCA – *Cold Cranking Ampere*

FCC – Fator de correção em função do número de ciclos

FCT – Fator de correção em função da temperatura

FCV – Fator de correção em função da vida

RC – *Reserve Capacity*

OCV – *Open Circuit Voltage*

SoC – *State of Charge*

SoH – *State of Health*

SoH<sub>FCD</sub> – Estado de Saúde calculado pelo fator de correção em função da descarga

SoH<sub>MOD</sub> – Estado de Saúde estimado pelo modelo

SoH<sub>REF</sub> – Estado de Saúde referencia

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ah – Ampère hora

$\mu\text{A}$  – Micro Ampère

$^{\circ}\text{C}$  – Graus Celsius

F – Farad

Hz – Hertz

I – Corrente

kHz – Kilohertz

mA – Miliampère

mV – Milivolt

s – Segundos

V – Volt

$\Omega$  – Ohm

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Estrutura no trabalho	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE BATERIAS</b>	<b>17</b>
2.1	Bateria Chumbo-Ácido	17
2.2	Propriedades das baterias	18
2.2.1	Tensão nominal	19
2.2.2	Capacidade nominal	19
2.2.3	Capacidade reserva	19
2.2.4	Tensão de circuito aberto	19
2.2.5	Estado de carga	20
2.2.6	Estado de Saúde	20
2.2.7	Resistência interna	20
2.2.8	Impedância e condutância	21
2.3	Determinação do SoH	22
2.4	Trabalhos Relacionados	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
3.1	Levantamento do modelo de descarga	25
3.2	Desenvolvimento do circuito	28
3.3	Software	32
3.3.1	Fator de correção em função do número de ciclos	32
3.3.2	Fator de correção em função da temperatura	34
3.3.3	Fator de correção em função da vida	36
3.3.4	Fator de correção calculado pelo teste	36
3.4	Relação entre b e SoH	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>40</b>
4.1	Testes de desempenho do circuito	40

<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>43</b>
5.1 Conclusão .....	43
5.2 Trabalhos futuros.....	43

# 1 INTRODUÇÃO

O contato com sistemas tecnológicos é inevitável e cresce cada vez mais em todos os lugares. Esses já estão completamente inseridos em nosso cotidiano e não apenas servem para nossa comodidade, mas também contribuem enormemente para aperfeiçoar sistemas de segurança, como os casos das portas eletrônicas em bancos. Os hospitais, a indústria automotiva, as empresas e também as residências dependem do bom funcionamento dos tecnológicos. Todavia, todos esses processos dependem de energia elétrica. Assim, qualquer falha no fornecimento de energia pode representar enormes prejuízos. Portanto, são necessários sistemas que forneçam energia contínua para suprir eventual falha no sistema de distribuição de energia para que os serviços mais básicos estejam assegurados, mantendo por exemplo portas trancadas ou iluminação de emergência ligada.

Para garantir o fornecimento ininterrupto de energia, são utilizados *nobreaks* também chamados de UPS (*Uninterruptible Power Supply*), que são compostos por bancos de baterias ou, em alguns casos, uma única bateria. Em sistemas *nobreak*, as baterias são exigidas somente quando há uma falha na rede da concessionária de energia elétrica. Ou seja, na maior parte do tempo são carregadas ou se mantêm em estado de espera para que, no momento em que são solicitadas, forneçam energia e garantam a operacionalidade do sistema ao qual estão acopladas. Sendo assim, consistem em uma parte essencial do sistema de energia ininterrupta, pois, se o fornecimento de energia pela concessionária falhar, todo o sistema dependerá da energia a ser fornecida pela bateria. Logo, é importante assegurar que as baterias estejam sempre em excelentes condições, evitando consequências que podem ser desastrosas.

O desenvolvimento de sistemas que garantam energia ininterrupta tem sido objeto de muita pesquisa há vários anos. Aliado a isso, é necessário o desenvolvimento de sistemas capazes de testar se cada bateria está devidamente carregada e com capacidade de fornecer a energia adequada para qualquer projeto em que ela seja incorporada.

## 1.1 Motivação

Sistemas de iluminação de emergência são amplamente utilizados e regulamentados segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especificamente na NBR 10898. Para o caso específico de elevadores, a NBR MR 207, refere, no item 6.3.6:

*“Deve-se dispor de luz de emergência independente e automática, com uma autonomia mínima de 1 h, que assegure uma iluminação mínima de 10 lux sobre a máquina, de modo a garantir a realização das operações de resgate.”*

Além disso, conforme também estabelecido na NBR NM 207, no item 14.2.3.5, deve estar disponível um sistema que permita a comunicação entre a cabina e o andar principal:

*“Um sistema de intercomunicação, ou dispositivo similar, alimentado pela fonte de emergência referida em 8.16.3, deve ser instalado entre o interior da cabina, a casa de máquinas e a portaria.”*

Portanto, para atender a norma, todas as cabinas e casas de máquinas de elevadores devem dispor de uma fonte de emergência, a qual, em caso de falha na rede de distribuição, manterá os dispositivos exigidos pela norma em correto funcionamento. Visando atender a essa exigência normativa, são utilizados sistemas que permitem manter a bateria continuamente carregada e, assim que ocorre uma falha na rede de distribuição de energia, o sistema de iluminação é automaticamente acionado.

Porém, visto que a falta de energia é eventual, não são raros os casos em que o sistema de chaveamento para a bateria é acionado e a bateria de emergência não consegue fornecer energia pelo tempo mínimo requisitado. Isso se deve ao envelhecimento da bateria ou ao comprometimento do seu estado de saúde.

## 1.2 Objetivos

Visando proporcionar mais segurança aos usuários de elevadores, propõe-se, neste trabalho, o desenvolvimento de um circuito capaz de verificar o estado de saúde da bateria. Este circuito possibilita apurar a necessidade de substituição precoce da bateria e, também, evita a troca desnecessária das que ainda apresentam boas condições. Além disso, essas medidas colaboram com a redução da produção de lixo e dos custos causados pela troca antecipada.

### 1.3 Estrutura no trabalho

A realização do projeto consiste, como primeiro passo, em realizar um estudo buscando os parâmetros mais usuais para mapear o comportamento da bateria durante a sua utilização.

Na etapa subsequente, serão buscadas as formas mais corriqueiras para a determinação ou estimativa destes parâmetros.

Após, são apresentadas as etapas de desenvolvimento do circuito eletrônico a ser utilizado em elevadores para determinar o estado de saúde da bateria.

Por fim, projetado o sistema, serão feitos testes no circuito com o objetivo de verificar o correto funcionamento do sistema, permitindo, dessa maneira, avaliar se o sistema é capaz de estimar corretamente o estado de saúde da bateria.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE BATERIAS

Os conceitos aplicáveis ao presente estudo se relacionam às propriedades das baterias, tais como: capacidade nominal, capacidade de reserva, tensão nominal, resistência interna, impedância, condutância e, o foco principal do presente estudo, o estado de saúde.

Os acumuladores elétricos têm diversas aplicações no cotidiano, tendo como função o armazenamento de energia. Pode-se citar algumas de suas aplicações mais comuns:

- Dispositivos móveis tais como *notebooks*, celulares, câmeras digitais;
- Veículos elétricos e híbridos;
- Energia de reserva para aplicações críticas tais como *nobreaks*, centrais telefônicas e sistemas de iluminação de emergência;
- Energia de partida, normalmente utilizada em veículos automotores.

Os acumuladores elétricos de energia podem ser de três tipos: baterias eletroquímicas, supercapacitores e células de combustível. Ainda que os supercapacitores e as células de combustível possuam uma série de vantagens sobre as baterias eletroquímicas, tanto no aspecto ambiental, quanto em ciclos de utilização, eles apresentam problemas como baixa densidade de armazenamento de energia e custo alto. Por estas razões, as baterias são escolhidas na maioria das aplicações.

### 2.1 Bateria Chumbo-Ácido

As baterias chumbo-ácido foram inventadas por volta de 1860, através da utilização de condutores de chumbo (ânodo) e dióxido de chumbo (cátodo), separados por um material isolante e submersos em uma solução aquosa de ácido sulfúrico (MARTINS, 1999). A finalidade básica das baterias é transformar energia química em energia elétrica e vice-versa, servindo assim de acumulador. O processo é reversível e a operação de carga e descarga pode ser executada centenas de vezes (BOSCH, 2007).

Os processos de carga e descarga da bateria estão associados ao modo como ela está sendo utilizada. Quando a bateria está fornecendo energia (descarregando), o chumbo do material ativo das placas positivas ( $\text{PbO}_2$ ) se combina com os íons sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) do ácido sulfúrico, formando nas placas positivas o sulfato de chumbo ( $\text{PbSO}_4$ ). Ao mesmo tempo, ocorre uma reação similar nas placas negativas onde o chumbo poroso ( $\text{Pb}$ ) se combina com os íons

( $\text{SO}_4^{2-}$ ) do ácido, formando também sulfato de chumbo. O esquema da bateria é apresentado na Figura 1.

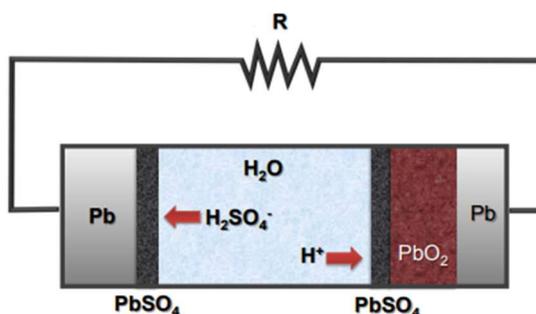
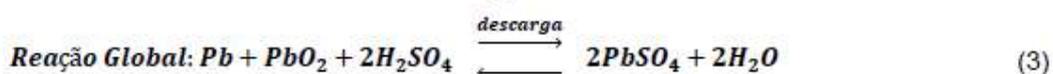
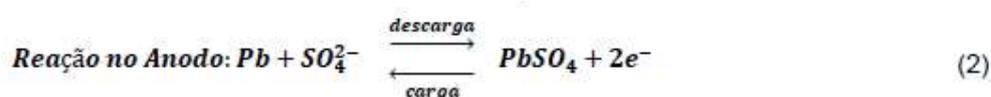
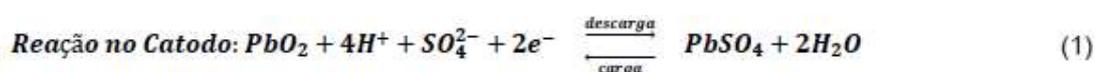


Figura 1 - Modelo esquemático de descarga de uma bateria de chumbo-ácido.

Fonte: CARNEIRO *et al.*, 2017.

Na bateria ambas as reações consomem o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) do ácido, fazendo com que haja cada vez menos ácido sulfúrico na solução. À medida em que a energia elétrica se esgota, a tensão da célula diminui, pois o ácido sulfúrico é consumido para produzir sulfato de chumbo. Já no processo de carga, ocorre a reação inversa (YANG *et al.*, 2014). (1) (2) (3) representam esse o processo de carga e descarga da bateria através da liberação de elétrons:



Dentre os tipos de baterias chumbo-ácido existem dois grandes grupos: as baterias seladas e as baterias não seladas, essa última também chamada de comum. Nas baterias comuns, com o passar do tempo, ocorre o consumo da água existente no seu interior fazendo com que seja necessária a reposição. Por esse motivo são chamadas de não seladas, pois possuem uma abertura que permite a adição de água, essa já em desuso atualmente.

Para o caso das baterias seladas, não só se utiliza chumbo, como também uma liga de chumbo-antimônio. Isso faz com que o consumo de água durante a utilização seja menor e, portanto, não seja necessária a manutenção de reposição de água.

## 2.2 Propriedades das baterias

Os critérios para aferição das propriedades das baterias estão estabelecidos na norma ABNT NBR 15940:2016, a partir dos quais é possível fazer a comparação entre as baterias.

Algumas dessas propriedades são apresentadas abaixo juntamente com outros parâmetros comumente utilizados em análises de baterias.

### 2.2.1 Tensão nominal

Tensão nominal da bateria é o resultado da multiplicação da quantidade total de células existentes pelo valor da tensão de cada célula. As baterias chumbo-ácido mais comuns possuem 2 volts de tensão em cada célula e um total de seis células, assim a tensão nominal é de 12 V (LIBERT, 2010).

### 2.2.2 Capacidade nominal

A capacidade nominal refere-se à capacidade da bateria em fornecer corrente por um determinado tempo. Esse parâmetro é quase sempre apresentado em A.h e pode ser classificado com um padrão conhecido como *C-rate*.

O *C-rate* refere-se à taxa na qual uma bateria é carregada ou descarregada. Comumente são expressos da seguinte forma: C5 e C20. Conforme MIT (2008), uma taxa de C1 significa que a corrente de descarga descarregará toda a bateria em 1 hora. Para uma bateria com capacidade de 100 A.h, isso equivale a uma corrente de descarga de 100 A. Uma taxa de C5 para esta bateria significa que a bateria deve suprir uma corrente de 500 Amperes, e uma taxa de C/2 implicaria em uma corrente de descarga de 50 Amperes.

### 2.2.3 Capacidade reserva

Esse parâmetro também é conhecido como capacidade reserva, tradução do termo em inglês, *Reserve Capacity* (RC). O parâmetro demonstra o tempo, em minutos, que uma bateria com tensão nominal 12 V, totalmente carregada pode fornecer 25 A até que sua tensão terminal chegue a 10,5 V. Este parâmetro visa identificar o tempo total que a bateria poderá manter os sistemas energizados que dela dependem (RAND *et al.*, 2004).

### 2.2.4 Tensão de circuito aberto

A tensão de circuito aberto, *Open Circuit Voltage* (OCV), como o próprio nome sugere, é o valor da tensão nos terminais quando a corrente fornecida pela bateria é nula enquanto a sua tensão varia menos que 5 mV por célula, ou seja, após extinção do efeito de relaxação, (RAND *et al.*, 2004).

### 2.2.5 Estado de carga

Estado de carga, mais popularmente conhecido em inglês como *State of Charge* (SoC), indica o percentual de energia acumulada na bateria. Existe uma boa correlação entre o SoC e o OCV, porém uma simples relação entre os dois parâmetros não é possível, pois o SoC depende também das condições da bateria como por exemplo estado de saúde da bateria, (RAHN; WANG, 2013).

### 2.2.6 Estado de Saúde

Outra medida essencial, o estado de saúde, *State of Health* (SoH), é um parâmetro utilizado principalmente no caso de sistemas de energia ininterrupta ou de emergência. O SoH é uma medida da capacidade que a bateria tem de fornecer a corrente especificada quando solicitada em relação a capacidade nominal, conforme apresentado em (4).

$$SoH = \frac{\text{Capacidade de armazenamento medida}}{\text{Capacidade de armazenamento nominal}} \quad (4)$$

Esse é um fator importante para o acompanhamento do desempenho da bateria uma vez que tenha entrado em uso. (LINDEN; REDDY, 2002)

### 2.2.7 Resistência interna

Este parâmetro representa a resistência ôhmica da bateria e, através dele, é possível determinar a quantidade de energia disponível em um intervalo de tempo. Para determinar a resistência interna, não se pode simplesmente conectar um ohmímetro aos terminais da bateria, pois a tensão existente nos terminais da bateria interfere na medida da resistência. Para a medição correta, primeiro é necessário medir a tensão em circuito aberto da célula. Em seguida, uma carga deve ser ligada, provocando um fluxo de corrente que reduzirá a tensão da célula devido à queda de tensão proporcional à resistência interna. A tensão da célula deverá ser medida novamente enquanto a corrente está fluindo, porém essa tensão não representa a tensão OVC, pois existe o efeito da dinâmica da bateria. A resistência é calculada pela lei de Ohm através da diferença de tensão entre as duas medições e a corrente que flui através da célula.

Além da dificuldade da medição da resistência devido à tensão existente nos terminais, essa medida também sofre influência considerável com a variação da temperatura, conforme Linden e Reddy (2002). Na Figura 2 é possível observar a influência da temperatura sobre o valor da resistência interna.

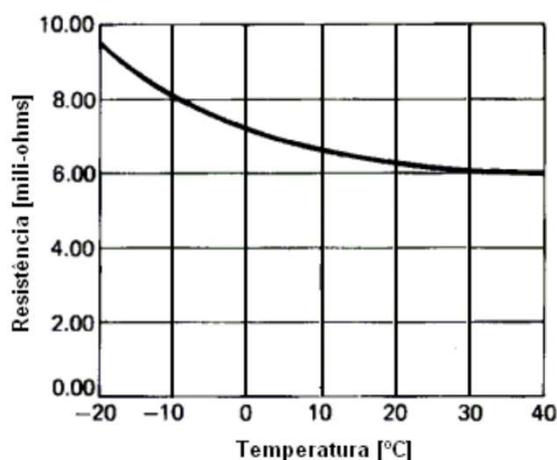


Figura 2 - Variação da resistência interna em função da temperatura para um modelo de bateria de chumbo-ácido.

Fonte: LINDEN; REDDY, 2002.

### 2.2.8 Impedância e condutância

A impedância e a condutância das baterias são parâmetros que diretamente não fornecem informações sobre as suas características. Devido ao circuito equivalente da bateria, é esperado que a impedância da bateria aumente com o tempo (FEDER; HLAVAC; MARK., 1993). Os fabricantes de baterias têm as suas próprias definições e convenções para impedância e condutância com base no método de ensaio utilizado.

O método envolve a aplicação de uma pequena tensão alternada  $E$  de frequência e amplitude conhecida em toda a célula e na medição da corrente alternada  $I$  que flui em resposta à ela.

A impedância  $Z$  é calculada pela Lei de Ohm:  $Z = E / I$ .

A admitância  $S$  é similarmente calculada como  $S = I / E$  (a recíproca da impedância).

Note que a impedância aumenta à medida que a bateria se deteriora, enquanto a condutância diminui. Assim,  $S$  relaciona-se diretamente com a capacidade da bateria de produção de corrente, enquanto  $Z$  proporciona uma relação inversa. A condutância da célula, portanto, proporciona uma aproximação indireta com o estado de saúde da célula. Esta medida pode ser aperfeiçoada tomando em conta outros fatores.

Além de impedância e admitância, estes testes detectam outros defeitos tais como células em curto e circuitos abertos. Estes métodos podem ser utilizados em células com diferentes composições. No entanto, fatores de calibração diferentes devem ser incorporados ao teste para levar em conta as diferenças nos perfis de envelhecimento dos diferentes elementos. Os testes

de impedância e condutância são rápidos e não afetam o desempenho da bateria (BADEDA *et al.*, 2018). Eles podem ser realizados enquanto a bateria está em uso ou podem ser utilizados para monitorar continuamente o desempenho da bateria, evitando a necessidade de testes de carga ou descarga.

### 2.3 Determinação do SoH

O estado de saúde é a medida que reflete a condição geral da bateria e a sua capacidade de entregar a corrente especificada quando comparada com uma bateria nova. Segundo Rand *et al.*, (2004), a relação é dada pela divisão entre a capacidade medida e a capacidade nominal. Além disso, leva-se em conta também fatores como aceitação de carga, resistência interna, tensão e autodescarga. Durante o tempo de vida da bateria, o seu desempenho ou “saúde” tende a se deteriorar gradualmente devido a mudanças físicas e químicas irreversíveis. Tais mudanças ocorrem com o uso e com a idade até que a bateria não possa mais ser utilizada. O SoH é uma indicação do ponto que foi alcançado no ciclo de vida da bateria e uma medida da sua condição em relação a uma bateria nova.

Os fabricantes de baterias não especificam o SoH, pois eles somente fornecem baterias novas, ou seja, em estado de saúde plena. Logo, o SoH somente se aplica a baterias que já estejam em uso, com o processo de envelhecimento em andamento, tanto no armazenamento, quanto em utilização normal. As definições de SoH são, portanto, especificadas pelos fabricantes de equipamentos de teste.

O SoH provê uma indicação do desempenho que pode ser esperado das baterias em sua condição atual (uma indicação de quanto tempo de vida útil da bateria foi consumido e quanto ainda resta antes da troca). Em aplicações críticas, como sistemas de espera ou de emergência, o SoH indica se uma bateria será capaz de suportar a carga quando solicitada. Assim, o conhecimento do SoH também ajudará equipes técnicas a anteciparem problemas, realizarem diagnóstico de falhas ou, ainda, efetuarem reposições em campo. Essa é essencialmente a função de monitoração das modificações da bateria ao longo do tempo.

Qualquer parâmetro que se modifica significativamente com o tempo, como a impedância ou a condutância da célula, pode ser usado como base para fornecer uma indicação do SoH da célula. Modificações destes parâmetros normalmente significam que outras modificações

ocorreram em outros parâmetros de maior importância para o usuário, como a resposta de corrente. Eles podem ser monitorados pelo desempenho da bateria, como a descarga pelo aumento da temperatura ocorrida durante a operação ou as modificações internas, a exemplo da corrosão.

Devido à indicação de SoH ser relativa à condição de uma bateria nova, o sistema de medição deve gravar um registro com as condições iniciais ou, pelo menos, ter um conjunto de condições padrão norteador, para que as medidas posteriores de impedância possam ser comparadas com as iniciais. Se a contagem de ciclos de carga e descarga é usada como medida da utilização da bateria, o número de ciclos de carga/descarga esperados de uma célula nova pode ser utilizado como referência.

Na prática, a forma mais simples de estimar o SoH de uma célula é através de uma medida simples, tanto de impedância, quanto de admitância. Na busca de precisão, outros parâmetros das células que também variam com a idade da bateria podem ser medidos a fim de refinar os resultados, fazendo uma estimativa da SoH de uma bateria a partir da combinação desses fatores. Os parâmetros normalmente usados em conjunto com a impedância são a capacidade de carga, a resistência interna, a autodescarga, a aceitação de carga, a capacidade de descarga e a contagem de ciclos.

As medições absolutas dependerão dos elementos químicos das células envolvidas. A ponderação é adicionada a fatores individuais, baseados na experiência, na composição da célula e na importância de um determinado parâmetro na aplicação da bateria. Se qualquer uma dessas variáveis fornecer medições errôneas, o resultado final será afetado. Uma bateria pode ter uma boa capacidade, mas a resistência interna ser alta. Neste caso, a estimativa SoH vai ser reduzida. Fatores de redução são adicionados se a bateria tem uma autodescarga elevada ou mostra outras deficiências químicas.

Para medições automatizadas, as condições iniciais e os dados previamente obtidos podem ser mantidos em memória para alimentar o processo. Esta experiência pode ser modificada por um processo de aprendizagem, à medida que mais dados são adquiridos para melhorar as estimativas. A definição do estado de saúde da bateria, aprovada ou reprovada no teste, é avaliada por um limite arbitrário, baseado na experiência com a aplicação, conveniência ou fatores de segurança.

## 2.4 Trabalhos Relacionados

Estudos indicam que o SoH e a impedância não podem ser diretamente relacionados, visto que sua dependem de fatores externos como temperatura ou ainda o próprio estado SoC (FEDER; HLAVAC; MARK., 1993). Porém, de acordo com Badeda, *et al* (2018), essas variações detectadas referem-se aos diferentes processos de medições observados, e não ao fato de não possuir uma correlação entre SoH e impedância.

Outros estudos apontam que a simples medição da impedância, conforme mencionada na Seção 2.2.9, não é suficiente para a determinação da SoH, pois a medida é baseada em apenas uma frequência (KIEL *et al.*, 2008). Os equipamentos mais atuais utilizados para estimar o estado de saúde de baterias firmam-se na variação da impedância da bateria em função tempo de utilização, como são os casos dos equipamentos da Hioki (BT3554) ou Fluke (*battery analyzer serie 500*), os quais utilizam uma frequência fixa (1 khz no caso do BT3554) para realização das medidas.

Visando contornar os problemas encontrados na utilização da medida de impedância baseada em apenas uma frequência para estimar o SoH, métodos mais recentes buscam utilizar a *electro-chemical impedance spectroscopy* (EIS), em tradução livre, espectroscopia de impedância química. O benefício desta técnica é que, ao invés de utilizar apenas uma frequência para avaliação da impedância, é utilizado um espectro de frequências. Com isso, tem-se maior precisão na estimativa da impedância e, conseqüentemente, na estimativa do SoH (GALEOTTI *et al.*, 2015). Porém, esses processos ainda são pouco utilizados em baterias de chumbo-ácido (KWIECIEN, *et al.*, 2018).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

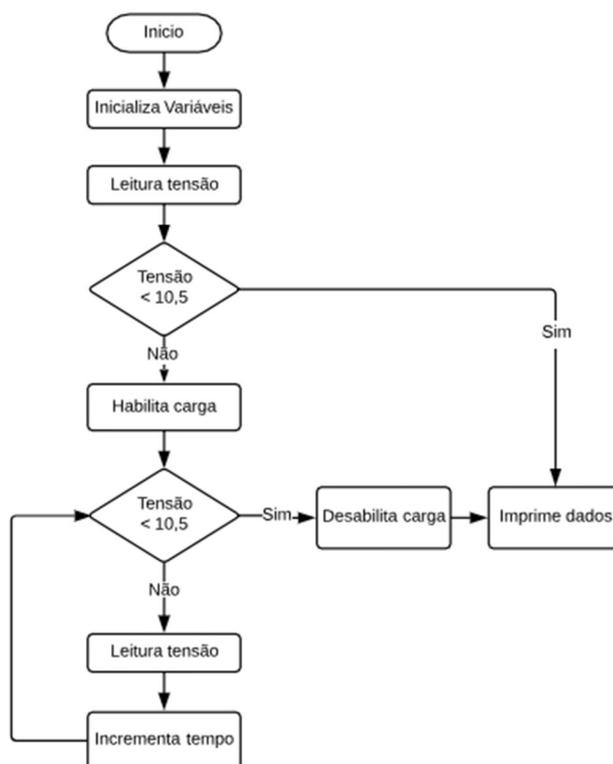
O desenvolvimento do projeto divide-se em duas partes. A primeira delas é a obtenção do modelo que descreve o comportamento da tensão da bateria quando conectada a uma carga. Com isso, será possível estabelecer uma relação entre o comportamento da tensão da bateria e seu estado de saúde. A segunda parte do projeto refere-se ao desenvolvimento de um circuito que possa ser conectado à bateria, responsável por estimar e exibir o estado de saúde.

### 3.1 Levantamento do modelo de descarga

Os sistemas existentes para estimar o estado de saúde da bateria são, em geral, desenvolvidos para teste de bancos de baterias, utilizados em *nobreaks* ou equipamentos similares e, por isso, tem custo elevado. Uma vez que neste trabalho o objetivo é a estimativa do estado de saúde de apenas uma bateria, não se faz necessária a utilização de um sistema de mesma complexidade o que permite também um menor custo. Os sistemas usados em bancos de baterias, além de identificarem se há alguma bateria avariada, devem identificar qual delas está apresentando tal defeito, diferentemente do sistema proposto neste trabalho, onde há apenas uma bateria para ser analisada.

O fato de não dispor de um testador de SoH, fez com que fosse necessário o desenvolvimento de um modelo do comportamento da tensão da bateria quando submetida à carga. O modelo obtido possibilitou a implementação do *software*, o qual juntamente com o circuito é capaz de identificar o SoH baseado no modelo proposto.

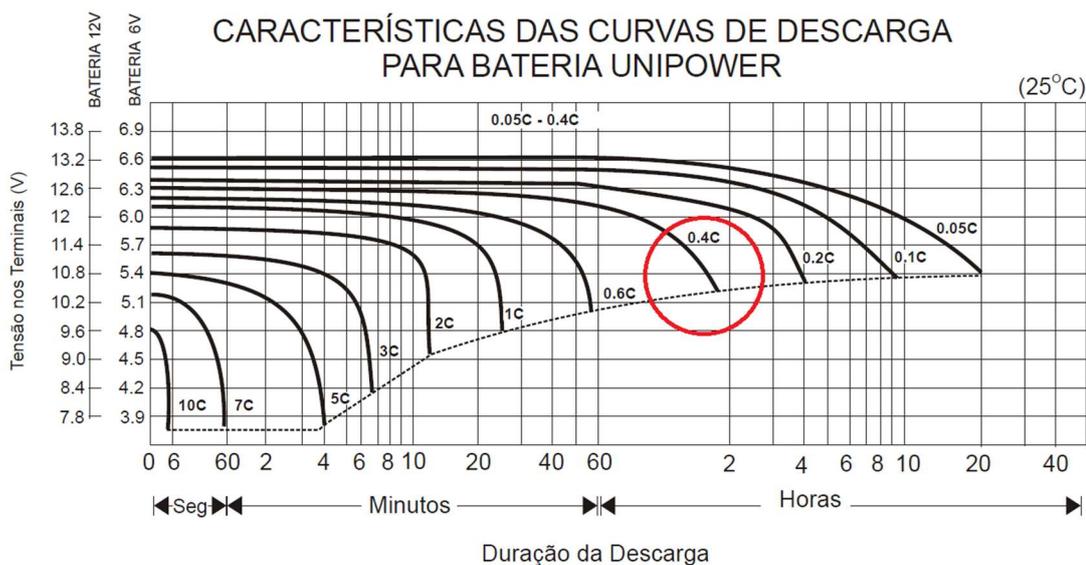
O levantamento do modelo foi realizado por meio da utilização de 9 baterias, sendo duas novas e outras sete usadas, sem nenhum histórico de uso das mesmas. O procedimento é apresentado no fluxograma da Figura 3 e consiste na conexão de uma carga resistiva aos terminais da bateria e a medição do tempo em que a bateria fornece energia até sua tensão terminal atingir 10,5 V. A tensão de 10,5 é chamada de tensão de corte (LINDEN; REDDY, 2002), pois o fabricante a recomenda como limite inferior, sob pena de reduzir a vida útil da bateria caso ultrapassada.



**Figura 3 - Fluxograma *software* do microcontrolador utilizado no teste da bateria.**

**Fonte: Autor.**

Conforme a Figura 4, uma bateria de 1,3 Ampere/ hora (modelo utilizado nos testes deste trabalho) deve fornecer uma corrente de 0,5 A por aproximadamente 120 minutos até que sua tensão seja igual à tensão de corte.



**Figura 4 - Curva de descarga de bateria.**

**Fonte: UNICOBA, 201?.**

A ligação da carga, medição da tensão e contagem do tempo são feitas através de um Arduino (apresentado na Figura 5), conectado à porta serial de um computador, o qual será responsável pela exibição dos dados das medidas ao final de cada teste. O procedimento de teste consiste em conectar a bateria ao sistema e, então, o microcontrolador seguirá os passos descritos no fluxograma da Figura 3.

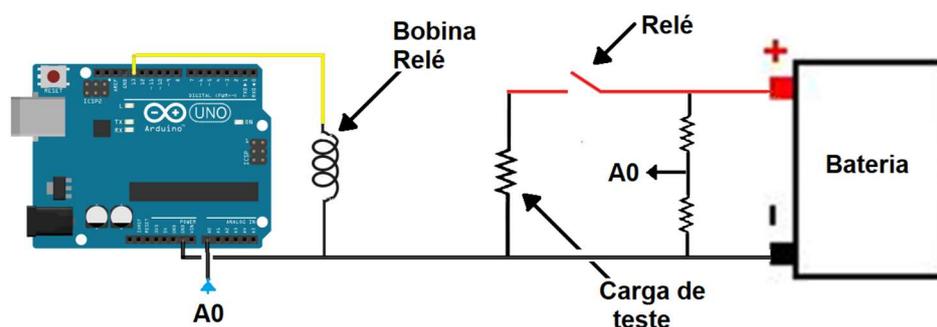
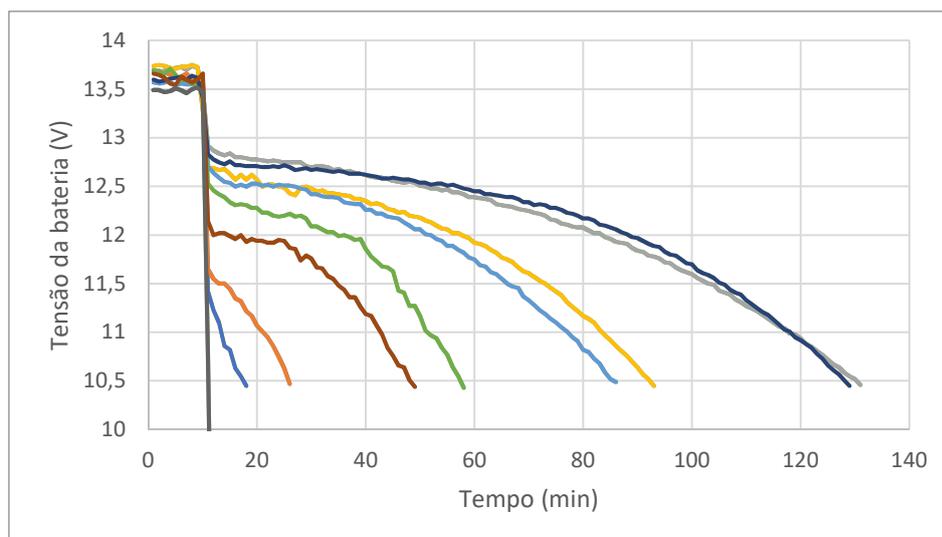


Figura 5 - Circuito de teste para obtenção do modelo de descarga da bateria.

Fonte: Autor.

Para cada bateria, foram realizados três ensaios iguais. Neles, carregava-se a bateria conforme (KITEC, 2018) e em seguida, submetia-a à descarga através da conexão da carga de teste. No gráfico da Figura 6, pode-se observar a média dos testes de descarga realizado em cada uma das baterias. Embora tenham sido realizadas três medidas para cada bateria e a distribuição dos dados seja pequena entre as três amostras, não se pode afirmar que as mesmas possuam uma distribuição *Gaussiana* (FISCHER, 2012), com isso não se pode garantir que as demais amostras se comportem de forma similar. Porém, devido ao grande tempo necessário para a realização de cada teste (aproximadamente, duas horas para a sua aquisição) não foram feitos testes suficientes para a avaliação da distribuição estatística dos dados.



**Figura 6 - Gráfico do modelo do comportamento da tensão em função do tempo para as 9 baterias testadas.**

**Fonte: Autor.**

Com os dados obtidos por meio dos testes realizados, é possível calcular o percentual da capacidade de carga em relação ao especificado pelo fabricante, de acordo com a Equação 4. A partir disso, foram classificadas as baterias conforme a Tabela 1, onde é apresentado o  $SoH_{REF}$  correspondente a cada bateria.

**Tabela 1 - Capacidade de armazenamento de cada bateria.**

**Fonte: Autor.**

Bateria	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
$SoH_{REF}(\%)$	40%	2%	7%	102%	33%	69%	13%	99%	63%

### 3.2 Desenvolvimento do circuito

Nesta seção será tratado especificamente do desenvolvimento do circuito que será conectado à bateria, o qual será encarregado por armazenar os dados de contagem de ciclos, período de utilização da bateria e exibição dos resultados. Por se tratar de sistemas que são utilizados em casos de emergência, o desenvolvimento tem como premissas:

- 1) Garantir que o sistema esteja disponível sempre que solicitado;
- 2) Consumir o mínimo de energia possível durante o procedimento de emergência.

Um esquemático do projeto pode ser visto na Figura 7. Nele, tem-se todo o sistema alimentado por uma rede 220 V fornecida pela concessionária; o quadro de comando encontra-se devidamente energizado de modo a fornecer energia continuamente para o carregamento da

bateria onde, por sua vez, fornece uma saída de 12 V, estes são feitos continuamente enquanto o quadro de comando está recebendo energia da concessionária.

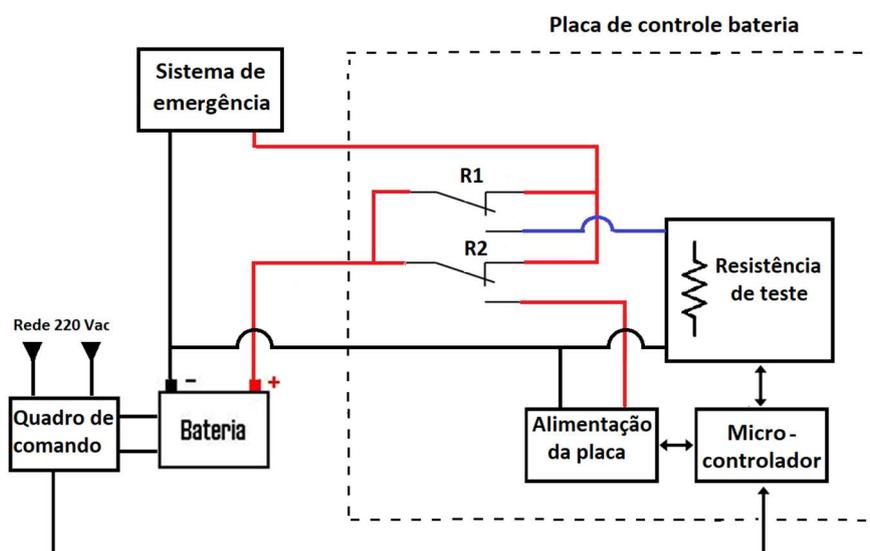


Figura 7 - Esquemático do circuito de medição da bateria.

Fonte: Autor.

A saída 12 V é utilizada neste projeto para a comutação do relé denominado R2 e também para uma interrupção do microcontrolador. Como a saída de 12 V está diretamente ligada à rede da concessionária (através de um transformador que integra o quadro de comando), no momento em que ocorrer uma falha na rede de distribuição, o relé R2 é comutado, fazendo com que a energia da bateria seja conectada ao sistema de emergência. Cabe salientar que essa comutação é feita independentemente do microcontrolador, evitando desta forma que, caso ocorra algum defeito no circuito, ele impeça a comutação do relé. O relé R2 é ainda responsável pelo fornecimento de energia para o circuito, pois toda a alimentação da placa ocorre apenas enquanto R2 estiver acionado, ou seja, enquanto houver energia na rede 220 V.

Adicionalmente a saída 12 V é utilizada em uma interrupção do microcontrolador, a qual é responsável por impedir a comutação do relé R1. Essa interrupção será apenas utilizada caso R2, por alguma falha mecânica, não seja comutado. Desse modo, a interrupção sinaliza o circuito que ocorreu uma falha no sistema de fornecimento de energia, e então o *software* impede a comutação de R1.

O relé R1 é responsável pela conexão da resistência de teste. A comutação deste relé é feita pelo microcontrolador, e representará que o circuito está em fase de teste. Como o relé tem seu contato normalmente fechado (NC), ligado ao sistema de emergência, o suprimento de energia deste sistema normalmente flui pelos seus contatos. Quando esse é comutado, a energia

da bateria passa a ser consumida pela resistência de teste, e, durante este período, não há suprimento de energia para o sistema.

O estado de saúde da bateria depende também de parâmetros que estão correlacionados ao tempo, como por exemplo o período de utilização da bateria. Para tal, fez-se necessário considerar no projeto um circuito de contagem de tempo, *Real Time Clock* (RTC). O DS1307 apresentado na Figura 8, bloco 3, foi o circuito escolhido, visto que ele é capaz de armazenar e fornecer informações completas de data como: ano, mês, dia do mês, horas, minutos e segundos. Adicionalmente, os meses com 31 dias e anos bissextos são ajustados automaticamente (MAXIM, 2015). Uma bateria de lítio, também apresentada na Figura 8, bloco 3, garante que os dados sejam preservados mesmo sem alimentação externa e é acionada automaticamente em caso de falta de energia no módulo.

Outro parâmetro que impacta de forma significativa a capacidade de carga da bateria é a temperatura a que está submetida, motivo pelo qual é fundamental o seu monitoramento. A correlação entre a capacidade de carga e a temperatura é apresentada na Figura 10. A medição da temperatura é feita por meio do sensor LM35, apresentado no bloco 12 da Figura 8, o qual proporciona uma variação da tensão linearmente dependente da temperatura em °C. O fato de o sensor selecionado possuir uma variação linear em relação a temperatura, tem-se aí uma vantagem importante na sua utilização, quando comparado a sensores que trabalham em escala absoluta, pois não é necessária a subtração de um grande *offset* (TEXAS, 1999) tornando-o, dessa forma, mais sensível.

Por fim, ainda é necessária a exibição da capacidade de carga atual da bateria para que se possibilite ao usuário a troca consciente. A indicação é feita através de 6 *leds*, apresentados no bloco 7 da Figura 8, que indicarão em forma percentual a capacidade da bateria, assemelhando-se ao sistema de exibição de bateria dos atuais *smartphones*. Um dos requisitos deste projeto é ter um baixo custo, portanto, não cabe a utilização de um *display*. Além disso, é mais fácil ao usuário ler uma escala com 6 *leds*, pois se torna intuitiva a necessidade de reparo quando necessário, como pode ser visto na Tabela 4.

Todo o sistema é controlado por um microcontrolador ATmega328, o qual é apresentado no bloco 1 da Figura 8. Este é um microcontrolador de 8 bits baseado em AVR com memória interna de 32 kbytes (ATMEL, 2016). Ele tem a capacidade de armazenar os dados mesmo quando a alimentação elétrica é removida através da memória EEPROM (*Electrically Erasable*

*Programmable Read Only Memory*), item fundamental neste projeto, pois é necessário o armazenamento do histórico da bateria. Esse microcontrolador ainda possui baixa dissipação de energia, baixo custo e contador de tempo com oscilador separado conforme pode ser visto na Figura 8.

Os blocos 4 e 9 atuam juntamente, sendo o bloco 4 composto de um optoacoplador, responsável pelo acionamento do relé de teste, e o bloco 9 representa os relés R1 e R2. Também são necessários os botões apresentados no bloco 6, o quais são responsáveis pelo *reset* da placa. O bloco 5, por sua vez, é o bloco responsável pelo regulador de tensão, que recebe a tensão de 12 V da bateria e regula para uma tensão de 5 V responsável pela alimentação do circuito. Ainda no bloco 5 o *led* D2 é o responsável por informar que o circuito está alimentado. Por fim, o bloco 8 representa um divisor de tensão, o qual tem a função de avisar ao microcontrolador que há energia no sistema de distribuição.

O bloco 10 apresenta os conectores de entrada e saída do sistema de alimentação, e o bloco 11 representa a resistência de carga, juntamente com o *led* D1 que indicará que o sistema está em teste.



reduz sua capacidade. Com esses parâmetros associados, foi desenvolvida uma função que representa o quanto da capacidade de carga foi gasto durante cada ciclo, chamado de correção em função do número de ciclos (FCC):

$$FCC \Leftarrow FCC_a - 7 * \left(1 - \frac{2800 - N_{ciclos}}{2800}\right) * \left(1 - \frac{3 - tempo_{desc}}{3}\right) * \left(1 - \frac{13,8 - profundidade}{13,8}\right) \quad (5)$$

\* 100

onde:

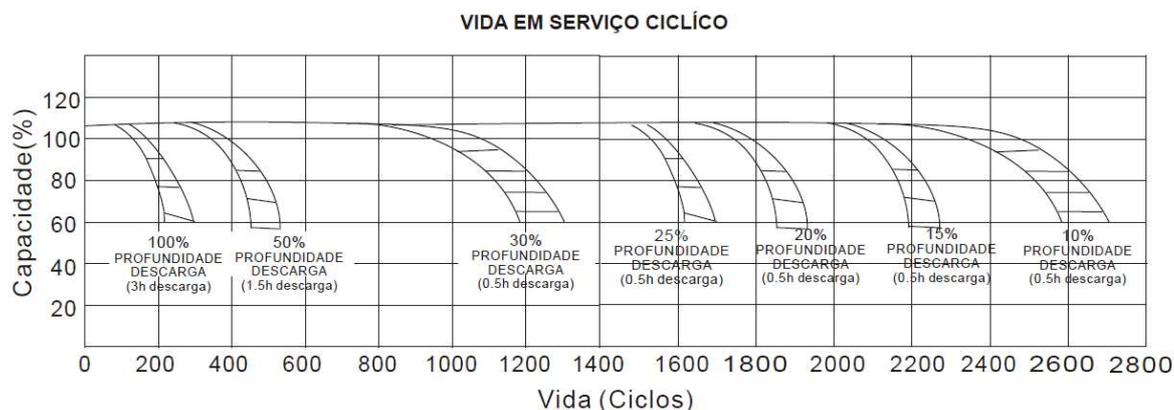
$FCC_a$  = FCC do ciclo anterior

$N_{ciclos}$  = número de ciclos

$tempo_{desc}$  = tempo em que a bateria permaneceu descarregada (em horas)

$profundidade$  = tensão mínima da bateria durante o ciclo de descarga.

Quando a bateria é instalada no sistema o parâmetro FCC tem seu valor carregado como 100, representando que a bateria está com sua capacidade de carga 100%. A cada ciclo, é consumido um pouco de sua capacidade em função do tempo que permaneceu descarregada e da profundidade da descarga, conforme apresentado na função de atualização do FCC apresentada acima.



**Figura 9 - Influência da profundidade de descarga associada ao número ciclos na vida da bateria.**

Fonte: UNICOPA, 201?.

O cálculo do FCC é feito assim que o sistema é religado (ou seja, após um novo ciclo). Para garantir a função referente ao FCC, rode assim que o sistema seja realimentado. O mesmo é feito dentro da função *setup()* a qual roda no momento em que o sistema é energizado. O novo valor é correspondente ao FCC é calculado e salvo na memória EEPROM para que a informação não seja perdida após o próximo ciclo. Os dados são salvos na memória com auxílio da

função *EEPROM.put (valor, endereço)* para qual devem ser passados dois parâmetros: o valor a ser colocado na memória, necessariamente uma variável do tipo *float* e o endereço de memória onde o dado será salvo, esse parâmetro deve ser uma variável do tipo *int*. A Tabela 2 apresenta os endereços de memória onde os dados serão salvos quando o sistema for desligado.

**Tabela 2 - Tabela de endereços de onde serão salvos os dados quando o sistema for desligado.**

**Fonte: Autor.**

Dado	Endereço	Descrição
FCC	100	Fator de correção em função do número de ciclos
FCT	110	Fator de correção em função da temperatura
Vida em horas	120	Vida da baterias em horas após conectado ao circuito

### 3.3.2 Fator de correção em função da temperatura

O segundo fator a ser considerado é o efeito da temperatura. Para maximizar a vida útil e o desempenho da bateria, sugere-se fazer a compensação de temperatura ajustando a tensão de carga a fim de evitar-se o fenômeno conhecido como “avalanche térmica” onde a temperatura interna dos vasos de um banco de baterias aumenta excessivamente. Este fenômeno pode ser evitado ajustando a tensão de carga quando um aumento da temperatura ambiente é detectado na bateria (LINDEN; REDDY, 2002). O aumento da temperatura ambiente aumenta a reação eletroquímica dentro do vaso (UNICOBA, 201?) e isso implica a deterioração da bateria. Como pode ser visto na Figura 10, traçando uma curva sobre os dados, temos a equação:

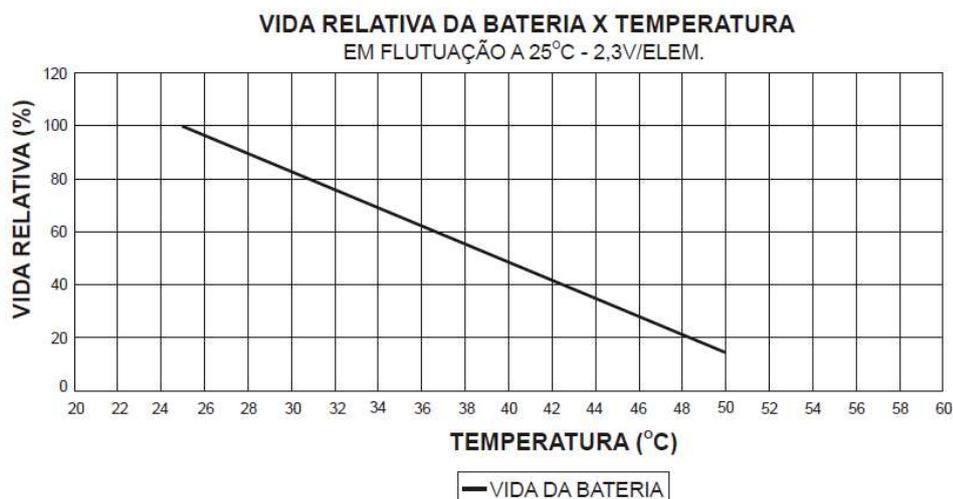
$$Vida\ relativa = -3,4 * temperatura + 185 \quad (6)$$

onde:

*Vida relativa* = Vida da bateria em (%)

*temperatura* = temperatura próximo a região onde a bateria está instalada.

A Equação (6) indica que a cada °C a que a bateria está submetida ocorre uma redução de 3,4 % de sua capacidade de carga. Por exemplo, se uma bateria estiver instalada em um local onde a temperatura ambiente for de aproximadamente 35 °C, ocorrerá uma redução de aproximadamente 34 % da sua vida relativa, considerando-se que a bateria esteja durante todo o período submetida a tensão de 35 °C.



**Figura 10 - Influência da temperatura sobre a capacidade de carga da bateria.**

**Fonte: UNICOBÁ, 201?.**

Baseado na Equação (6) pode-se implementar uma função similar à implementada no FCC, onde a cada hora é calculado o valor do fator de correção em função da temperatura (FCT) esse cálculo é feito através da Equação (7).

$$FCT \Leftarrow FCT_a - 3.4 * \frac{(temperatura - 25)}{61320} \quad (7)$$

onde:

$FCT_a$  = FCT do ciclo anterior

O FCT também deve ser armazenado na memória EEPROM conforme o procedimento do FCC. Todavia, há uma peculiaridade na memória EEPROM: por possuir uma quantidade limitada de ciclos de gravação, não é possível implementar a gravação dos dados a cada hora. Para contornar tal situação, aproveitou-se a interrupção previamente implantada na porta 2 do microcontrolador de maneira a detectar possíveis falhas no sistema de energia que possam vir a ocorrer simultaneamente em uma interrupção, e então chama-se uma função responsável pelo salvamento dos dados. Durante o intervalo entre a falha de energia e o salvamento dos dados o microcontrolador é alimentado pela energia remanescente no capacitor de 1000  $\mu$ F que pode ser visto na Figura 8 conectado à saída do regulador de tensão 7805.

### 3.3.3 Fator de correção em função da vida

De acordo com Rahn e Wang (2013), o ciclo de vida das baterias depende de fatores químicos, temperatura, ciclos de carga e da própria idade de bateria. Visando considerar essa variação é mensurado o fator de correção em função da vida (FCV) é baseado na vida média de uma bateria. Conforme apresentado na Figura 11, a vida média de uma bateria com capacidade inferior a 30 Ah é de cerca de 7 anos, e varia com o passar dos anos. (UNICOBA, 201?). Para que fosse possível a implementação deste fator de correção foi traçada uma curva média que é apresentada na Equação (8) e representa a variação da capacidade de carga em função da idade da bateria.

$$FCV = -0,3081 * idade^3 + 1,4729 * idade^2 - 2,3056 * idade + 100 \quad (8)$$

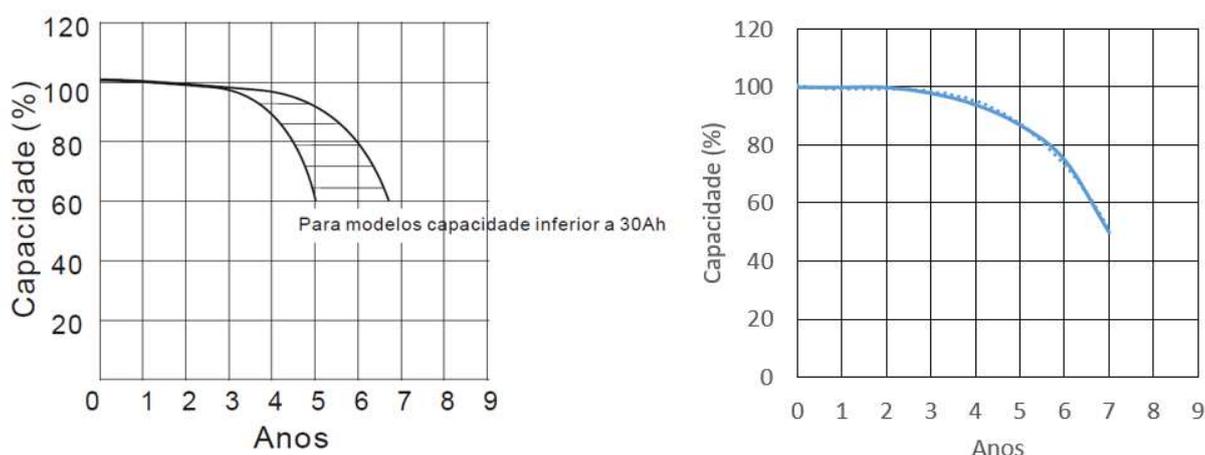


Figura 11 - Influência da idade da bateria na sua capacidade de carga.

Fonte: Adaptado de (UNICOBA, 201?).

### 3.3.4 Fator de correção calculado pelo teste

O quarto fator a ser considerado é derivado do teste de descarga da bateria, como será uma estimativa direta do SoH da bateria, será chamado aqui de fator de estado de saúde relativo ao fator de correção de descarga ( $SoH_{FCD}$ ). Este fator tem como função avaliar fisicamente o comportamento da bateria.

Como pode ser visto na Figura 8, o resistor R3 é o resistor de carga, quando o relé R2 é comutado a bateria é desconectada do sistema de emergência e automaticamente conectada no resistor. Durante o intervalo de tempo no qual o resistor está conectado a bateria, a mesma é descarregada e sua tensão é medida e salva a cada minuto.

Com os dados de tempo é possível ajustar uma reta através do método dos mínimos quadrados, onde visa-se minimizar o erro quadrático médio. A Equação (9) apresenta o modelo utilizado para obtenção da inclinação da reta ajustada aos dados.

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (9)$$

Após definidos os parâmetros que serão considerados na determinação do SoH da bateria, deve-se, então, definir o peso de cada um dos parâmetros para que seja possível definir a Equação do SoH:

$$SoH_{MOD} = \frac{x.FCT + y.FCV + z.FCC + k.SoH_{FCD}}{x + y + z + k} \quad (10)$$

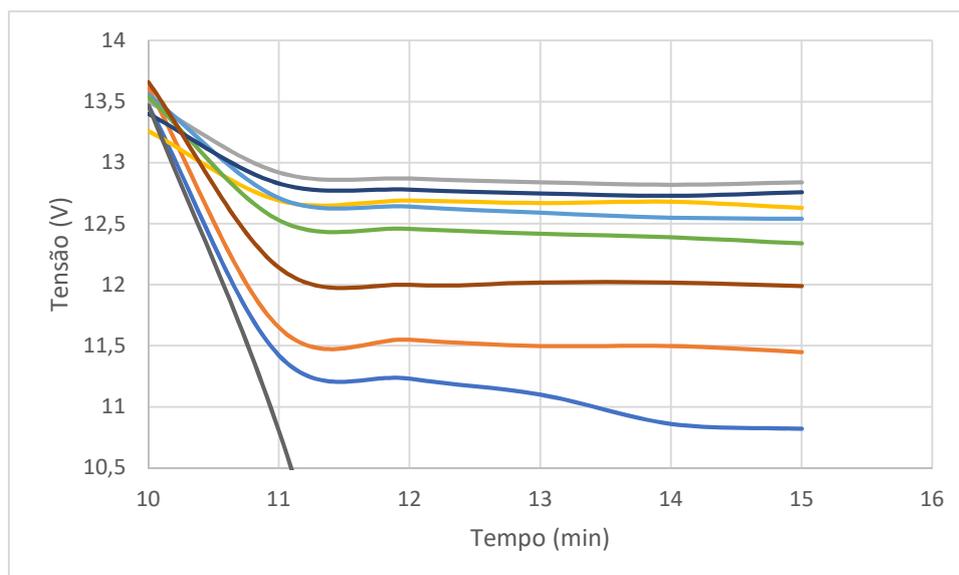
onde  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $k$ , representam os pesos de cada um dos parâmetros.

Como peso de cada parâmetro não é especificado pelo fabricante da bateria, optou-se em utilizar o mesmo peso para todos os pesos, desta forma  $x = y = z = k = 1$ . Com estes pesos definidos é possível obter todas as funções que serão consideradas no cálculo do SoH e, assim, realizar os testes de desempenho do sistema.

### 3.4 Relação entre $b$ e SoH

Com as funções FCC, FCT, FCV, que “consomem” a capacidade de carga da bateria, devidamente estabelecidas, ainda é necessário definir a correlação entre o parâmetro  $b$  apresentado na equação (9) e o estado de saúde de cada uma das baterias, apresentado na Tabela 1, para definição do  $SoH_{FCD}$ . Para isso, os dados de tensão e tempo, coletados na etapa de obtenção do modelo de descarga da bateria, foram exportados para o programa *Excel* onde é calculado o valor de  $b$  para cada teste realizado, considerando-se os 5 primeiros minutos de descarga.

A aplicação da Equação (9) apenas entre os 5 primeiros pontos, deve-se a duas razões: a primeira delas decorre do fato de que em operação normal, serão coletados dados por apenas 5 minutos para evitar uma descarga demasiada da bateria. A segunda razão pela qual são usados apenas os 5 primeiros pontos é o fato de que neste intervalo de tempo nota-se a maior variação de tensão x tempo, como apresentado na Figura 12.



**Figura 12 - Variação tensão logo após ligação da carga de teste.**

**Fonte: Autor.**

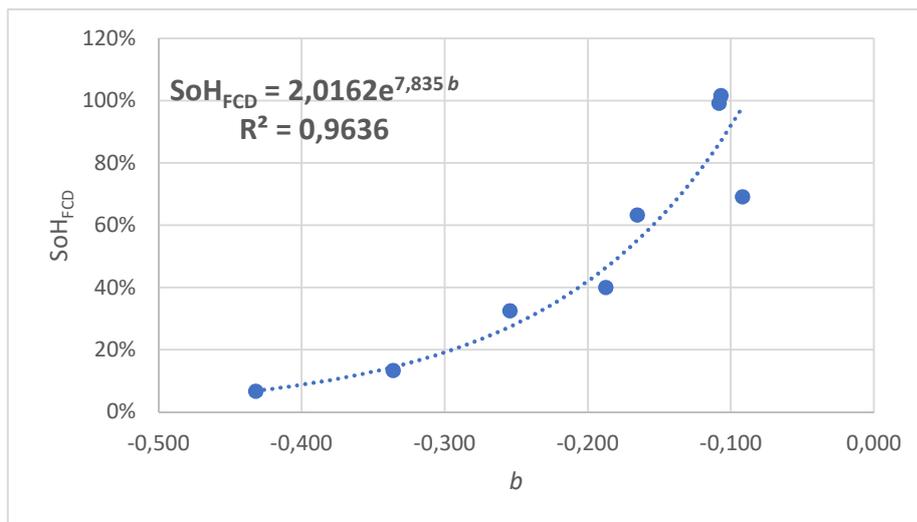
Definido o conjunto de dados a serem utilizados para o cálculo de  $b$ , a Equação (9) é aplicada aos dados dos 3 diferentes testes realizados em cada bateria. Os resultados são apresentados na Tabela 3. Foi calculado também o  $b$  médio, através da média aritmética em entre resultados dos 3 testes.

**Tabela 3 - Resultados obtidos para o  $b$ .**

**Fonte: Autor**

Bateria	SoH <sub>REF</sub>	$b$ teste 1	$b$ teste 2	$b$ teste 3	$b$ médio
1	40%	-0,185	-0,178	-0,200	-0,188
2	2%	-3,135	-3,160	-3,070	-3,122
3	7%	-0,430	-0,431	-0,435	-0,432
4	102%	-0,104	-0,101	-0,117	-0,107
5	33%	-0,248	-0,243	-0,272	-0,254
6	69%	-0,091	-0,097	-0,088	-0,092
7	13%	-0,323	-0,336	-0,350	-0,336
8	99%	-0,101	-0,109	-0,116	-0,108
9	63%	-0,161	-0,159	-0,176	-0,166

Com o parâmetro  $b$  calculado entre os diferentes testes de cada bateria, avaliou-se que para a bateria 2 o valor de  $b$  médio possui uma diferença de cerca de 700% em relação ao segundo maior  $b$  (em módulo) obtido para a bateria 3. Assim, optou-se por descartar esse valor. Desconsiderado o valor de  $b$  para a bateria 2, em razão da discrepância em relação aos demais resultados, os dados de  $b$  para as outras baterias foram plotados em um gráfico visando definir a relação entre o  $b$  e SoH. Esse resultado é apresentado na Figura 13, juntamente com a equação ajustada para os dados e o coeficiente de correlação.



**Figura 13 - Relação entre o parâmetro  $b$  e o SoH.**

**Fonte: Autor**

Obtém-se da Figura 13 a relação entre o parâmetro  $b$  e o SoH, através de um ajuste obtido pelo *Excel*, relação essa utilizada para o cálculo do  $SoH_{FCD}$ .

$$SoH_{FCD} = 2,0162e^{7,835b} \quad (13)$$

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante os testes de validação do circuito implementado. Inicialmente, é apresentado o procedimento utilizado para determinação da relação entre o parâmetro  $b$  e SoH. A etapa subsequente refere-se à validação do projeto, que consiste em avaliar o desempenho das funções (FCC, FCV, FCT,  $SoH_{FCD}$ ) com baterias de SoH conhecido.

### 4.1 Testes de desempenho do circuito

Nesta subseção serão apresentadas as considerações sobre como serão exibidos os resultados dos testes. Em seguida, será mostrado o procedimento de teste utilizado para validação de cada uma das funções dos fatores de correção do SoH.

Para a exibição dos resultados, como mencionado anteriormente, serão definidas faixas para indicar o estado de saúde da bateria. A exibição destas faixas será feita através da escala de *leds*, com a qual será possível determinar a necessidade ou não da troca da bateria, como pode ser visto na Tabela 4.

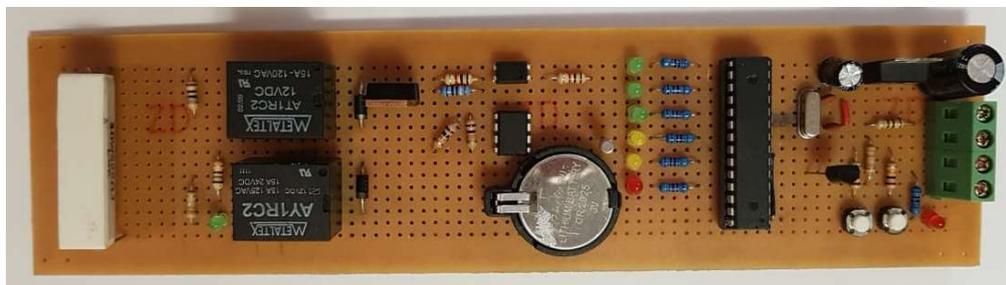
**Tabela 4 - Tabela de indicação do  $SoH_{MOD}$  em relação ao estado dos *leds*.**

Fonte: Autor

Nível	Máx	Mín	Estado	Visualizador
1	100	88	Verde	
2	88	77	Verde	
3	77	65	Verde	
4	65	53	Amarelo	
5	53	42	Amarelo	
6	42	30	Vermelho	

A última etapa é o teste do circuito como um todo. Como pode ser visto na Figura 14, o circuito foi implementado em uma placa de desenvolvimento, por questões de custo e tempo de fabricação. Para o procedimento de teste foram utilizadas as mesmas 9 baterias utilizadas no levantamento do modelo de descarga da bateria, das quais se sabe o SoH, conforme apresentado na Tabela 1. Na etapa posterior, a placa de teste foi conectada a cada uma das baterias e, então, aplicou-se o procedimento de *reset* da placa (mantendo os botões da placa pressionados por 5

segundos). Desta forma, todos os parâmetros como, FCT, FCV, FCC, são carregados com seu valor máximo. Após esse procedimento, deve-se aguardar um ciclo de teste para determinação do  $SoH_{FCD}$ .



**Figura 14 - Circuito implementado na placa de desenvolvimento.**

**Fonte: Autor.**

Em operação normal, o teste para determinação do  $SoH_{FCD}$  só é feito após 12 horas de operação do sistema. Esse tempo é necessário para que a bateria apenas seja testada após estar completamente carregada. Durante os testes esse *delay* foi desabilitado visando reduzir o tempo de teste. Com isso, logo após o circuito ser conectado à bateria, o procedimento de teste de determinação do  $SoH_{FCD}$  é iniciado. Quando o teste finaliza, o estado dos *leds* é atualizado e os dados são exibidos na tela do computador, juntamente com os valores de FCV, FCC, FCT. A exibição dos dados na tela do computador é permitida por meio do procedimento apresentado nos apêndices.

Baseado no procedimento acima descrito, os valores de cada um dos quatro parâmetros que influenciam a vida da bateria foram anotados, permitindo assim a construção da Tabela 5, onde os resultados são apresentados.

É possível observar a partir da Tabela 5, tomando como exemplo caso da bateria 3, onde o  $SoH_{REF}$  determinado Seção 3.2, é de 7%, e o  $SoH_{MOD}$  obtido pelo circuito foi de 76%, que os resultados obtidos não representam o real SoH de cada bateria.

**Tabela 5 - Resultados do teste gerados pelo circuito.**

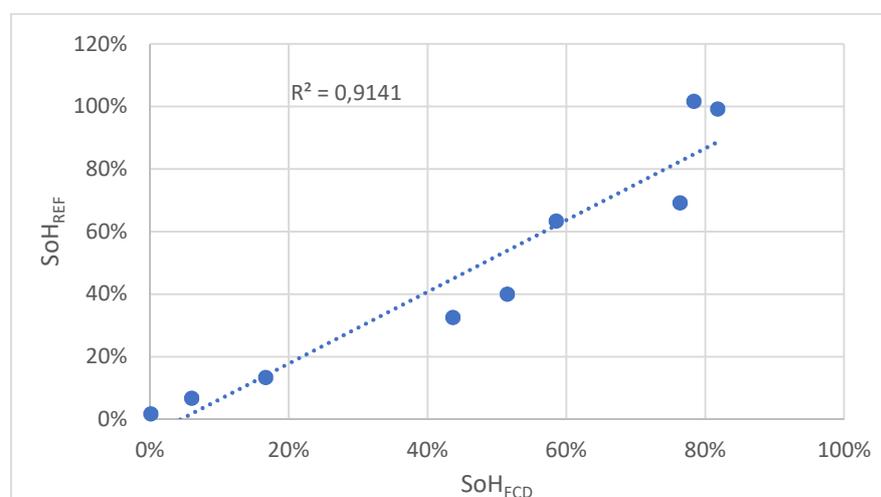
**Fonte: Autor**

Bateria	$SoH_{REF}$	$SoH_{FCD}$	$SoH_{MOD}$
1	40%	51%	87,9%
2	2%	0%	75,0%
3	7%	6%	76,5%
4	102%	78%	94,6%
5	33%	44%	85,9%
6	69%	76%	94,1%

7	13%	17%	79,2%
8	99%	82%	95,4%
9	63%	58%	89,6%

Esse problema ocorre pelo fato de o circuito desenvolvido ser projetado para acompanhar a bateria desde o início de sua operação. Como a maior parte das baterias utilizadas nos testes já estavam em uso, e não se sabe o tempo de utilização, tampouco o número de ciclos ao qual elas foram submetidas, todos os fatores FCV, FCT, FCC, estão com valor máximo, não representando o real estado de cada bateria. Como esses parâmetros estão com valor máximo, eles não afetam o estado de saúde da bateria. Ainda sobre a Tabela 5, é possível observar que menor o SoH da bateria, maior o erro encontrado (comparando  $SoH_{REF}$  e  $SoH_{MOD}$ ), o que corrobora para o fato que se o circuito estiver conectado à bateria durante toda sua vida melhor será a estimativa do SoH.

Todavia, ao comparar o  $SoH_{FCD}$  com o  $SoH_{REF}$ , este último determinado na Seção 3.2, observa-se que possuem uma boa correlação, qual seja, 0,9141, como pode ser visto na Figura 15.



**Figura 15 - Correlação entre  $SoH_{FCD}$  e SoH.**

**Fonte: Autor**

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusão

Considerando que o objetivo deste trabalho era o desenvolvimento de um circuito capaz de estimar o estado de saúde de uma bateria de chumbo-ácido, pode-se concluir que seu propósito foi atingido com êxito. O projeto desenvolvido é capaz de estimar o SoH, além de respeitar os requisitos de segurança aos quais se propôs.

Fica clara também a necessidade de o circuito estar conectado à bateria durante toda a sua utilização, pois, caso contrário, os resultados obtidos não corresponderão ao real SoH da bateria. Como pode ser visto nos resultados apresentados ao longo do trabalho, o fato do sistema não estar conectado à bateria durante o seu processo de utilização fez com que o sistema não fosse capaz de estimar de forma correta o estado de saúde das baterias.

Outro ponto que merece ser ressaltado é a correlação encontrada entre o  $\text{SoH}_{\text{FCD}}$  e o SoH, indicando que o circuito projetado é capaz de estimar o SoH. Contudo, a verificação do  $\text{SoH}_{\text{FCD}}$  faz-se através da adição contínua de ciclos de descarga da bateria, os quais não são considerados no FCC, presumindo que possuam baixa influência na redução do SoH.

Salienta-se que é necessária a realização do aprofundamento dos testes para que se determine corretamente os pesos dos parâmetros  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $k$ , os quais influenciam de forma significativa os resultados do projeto. Por fim, cabe ressaltar que o sistema depende de uma segunda bateria, que é responsável pela contagem de tempo da vida da bateria, e, assim, o sistema fica dependente também do estado de saúde de uma segunda bateria, a qual não prejudica de forma significativa o desempenho do circuito, visto que a vida desta segunda bateria é muito maior que a vida da bateria para a qual o circuito deve estimar o SoH.

### 5.2 Trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a implementação de melhorias no sistema, destacando a necessidade de maiores séries de dados para obtenção de um modelo de descarga mais robusto, juntamente com os testes para determinação do peso  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $k$ , não contemplados neste trabalho. Outra importante avaliação para trabalhos a serem desenvolvidos é a verificação da influência dos ciclos adicionais acrescentados pelo  $\text{SoH}_{\text{FCD}}$ .

Outro viés interessante de implementação é a possibilidade de utilizar o circuito desenvolvido para teste de outras baterias, cabendo para esse caso apenas a calibração do modelo para cada bateria. Com isso, seria possível adicionar um *menu*, onde através dos botões já presentes na placa, seria possível selecionar o modelo de bateria ao qual o circuito será conectado.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATMEL CORPORATION. **Datasheet ATmega328**. Disponível em: <[http://www1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-42735-8-bit-avr-microcontroller-atmega328-328p\\_datasheet.pdf](http://www1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-42735-8-bit-avr-microcontroller-atmega328-328p_datasheet.pdf)>. Acesso em 15/09/2018.

BADEDA, J. *et al.* **Battery State Estimation for Lead-Acid Batteries under Float Charge Conditions by Impedance: Benchmark of Common Detection Methods**. Applied Sciences, Basileia, 8, 1308, 2018.

CARNEIRO, R. L. *et al.* **Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento** Rev. Virtual Quim., 2017, 9 (3), p 889-911.

FEDER, D.O.; Hlavac, M.J.; Mark, K.W. **Evaluating the state-of-health of flooded and valve-regulated lead/acid batteries. A comparison of conductance testing with traditional methods**. Journal Power Sources, Lausana, 46, 391–415, 1993.

FISCHER, I. **Sampling Distribution of a Normal Variable** Disponível em: <[http://pages.stat.wisc.edu/~ifischer/Intro\\_Stat/Lecture\\_Notes/5\\_-\\_Central\\_Limit\\_Theorem/5.2\\_-\\_Formal\\_Statement\\_and\\_Examples.pdf](http://pages.stat.wisc.edu/~ifischer/Intro_Stat/Lecture_Notes/5_-_Central_Limit_Theorem/5.2_-_Formal_Statement_and_Examples.pdf)> Acessado 05/11/2018.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. 8. ed. São Paulo, Thomson Learning, 2006.

GALEOTTI, M. *et al.* **Performance analysis and SOH (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy**. Energy, Amsterdã, 89, 678–686, 2015.

HUET, F. **A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries**. Journal Power Sources, Lausana, 70, 59–69, 1998.

KIEL, M. *et al.* **Validation of single frequency Z measurement for standby battery state of health determination**. In Proceedings of the 30th INTELEC, San Diego, CA, USA, 14–18, 2008.

KITEC. **Manual de utilização do carregador de baterias KITEC-24A10C**. Disponível em: <<http://www.kitec.ind.br/manuais.html>> Acessado em: 15/09/2018

KWIECIEN, M. *et al.* **Determination of SoH of Lead-Acid Batteries by Electrochemical Impedance Spectroscopy**. Applied Sciences, Basileia, 8, 873 2018.

LIBERT, Nikolas. **Manutenção de Sistemas Eletrônicos Industriais**, Tecnologia em Automação Industrial. Acumuladores de Energia. [S.l.], ago. 2010.

LINDEN, D.; REDDY, T. B.; **Linden's Handbook of Batteries**, 3. ed. New York: McGraw-Hill Professional Ed., 2001.

MANUAL DE BATERIAS BOSCH. Disponível em: <[http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download\\_2/baterias/Manual\\_de\\_Baterias\\_Bosch\\_6\\_008\\_FP1728\\_04\\_2007.pdf](http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/baterias/Manual_de_Baterias_Bosch_6_008_FP1728_04_2007.pdf)> Acesso em: 08 jun. 2018.

MARTINS. Roberto de Andrade, Alessandro. **Volta e a invenção da pilha: dificuldades no estabelecimento da identidade entre o galvanismo e a eletricidade**. Acta Scientiarum, São Paulo, 21(4), 823-835, 1999.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **Datasheet DS1307**. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>> Acesso em 10/09/2018

MIT. **A Guide to Understanding Battery Specifications**. MIT Electric Vehicle Team, Dezembro de 2008.

RAHN, C. D.; WANG, C. Y. **Battery Systems Engineering**, Pennsylvania, USA, John Wiley & Sons. 2013.

RAND, D. A. J. *et al* **Valve-regulated Lead–Acid Batteries**, Amsterdã, Elsevier, 2004.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet LM35**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/smlink/lm35.pdf>>. Acesso em 05/09/2018.

UNICOBA. **Manual Técnico Unipower: Série UP**. São Paulo: [s.n], [201?]. 18 p. Disponível em: <<https://www.robocore.net/upload/ManualTecnicoBateriaUnipower.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

YANG, D. *et al.* **A novel ultrafine leady oxide prepared from spent lead pastes for application as cathode of lead acid battery**. Journal of Power Sources, Lausana, 2014, 257, 27.

## 7 APÊNDICE I

### 7.1 Montagem utilizada para exibição dos dados no computador.

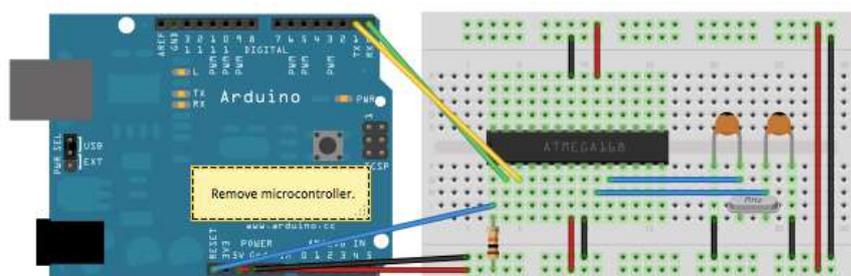


Figura Apêndices 1 - Diagrama de conexão entre Arduino e micro controlador.

Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard>

### 7.2 Baterias utilizadas para teste.



Figura Apêndices 2 - Baterias utilizadas no processo de teste. Fonte: Autor