



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA - INSTITUTO DE MATEMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA**

**GEYDISON GONZAGA DEMETINO**

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BATERIAS DE  
CHUMBO-ÁCIDO**

Salvador  
2014

**GEYDISON GONZAGA DEMETINO**

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BATERIAS DE  
CHUMBO-ÁCIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito  
parcial para obtenção do título de mestre em mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Salvador  
2014

**GEYDISON GONZAGA DEMETINO**

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BATERIAS DE  
CHUMBO-ÁCIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em mecatrônica.

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe – Orientador \_\_\_\_\_

Doutor em Física Nuclear, Universite Catholique de Louvain, U.C.L., Bélgica  
Universidade Federal da Bahia.

Prof. Dr. Antônio Cezar de Casto Lima \_\_\_\_\_

Doutor em Engenharia Eletrônica, University of Kent, U. Kent, Inglaterra  
Universidade Federal da Bahia.

Prof. Dr. Germano Pinto Guedes \_\_\_\_\_

Doutor em Engenharia Nuclear pela Universidade Federal do Rio De Janeiro, Brasil  
Universidade Estadual de Feira de Santana.

*Dedicado a toda minha família e amigos*

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Deus e a minha família.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe pela orientação, amizade e ensinamentos. Serei sempre grato.

A equipe do Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO) do Instituto de Física da UFBA, do Laboratório de Parafinas (LABPAR), do Grupo de Aplicaciones Energeticas y Sostenibles (SEAG) da *Universidad de Santiago de Compostela*, Espanha. Do Laboratório de Instrumentação e Energia solar da Universidade Estadual de Feira de Santana e do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

Aos professores do programa de pós-graduação em mecatrônica (PPGM) da UFBA.

Ao Sr. Jose Mário Bispo, Sr<sup>a</sup>. Ilma Bispo e Francisco Bispo.

E a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

A todos vocês meu muito obrigado.

*“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário”*  
*Albert Einstein.*

## RESUMO

Este trabalho descreve o projeto, desenvolvimento e testes de um sistema para aquisição de dados de baterias de chumbo-ácido. Esses dados são utilizados para o gerenciamento e monitoramento das baterias em diversos sistemas que as utilizam, por exemplo, sistemas de geração de energia solar e eólica, telecomunicações, cadeiras de rodas elétricas, carros elétricos e sistemas ininterruptos de energia. O sistema é composto por componentes mecânicos, eletrônicos e de software. Ele adquire valores de tensão e corrente da bateria em descarga à corrente constante e valores de tensão da bateria em circuito aberto, essas grandezas são tratadas por um circuito de condicionamento de sinal que em seguida são digitalizados e enviados, via padrão RS-232, para um computador, onde um software dedicado foi previamente instalado. O software é responsável por mostrar os dados, salva-los e permitir a interação com o usuário. A partir dos dados adquiridos são obtidas: curvas de carga, curvas de recuperação pós-carga, curvas de descarga, curvas de recuperação pós-descarga, quantidade de carga e estado de carga. Essas informações, principalmente o estado de carga, são utilizadas para estudo do comportamento das baterias, monitoramento, desempenho, qualidade e prevenção de falhas.

**Palavras chave:** Baterias de chumbo-ácido, estado de carga, aquisição de dados.

## ABSTRACT

This work presents the design, development and testing of a data acquisition system for lead-acid batteries. These data are used for battery managing and monitoring on several applications, for example, solar and wind energy systems, telecommunication, electric wheelchair, electric vehicles and uninterruptable power systems. The system consists of mechanical, electronic and software components. It acquire battery voltage and current values at constant current discharge and voltage values at open circuit voltage. These quantities are handled by a signal conditioning circuit which are then digitalized and sent; via RS-232 standard to a computer; where a dedicated software was previously installed. The software is responsible for displaying data, store it and allow user interaction. By using the acquired data, are obtained: charging curve, resting curve after charge, discharging curve, resting curve after discharge, quantity of charge and state of charge. This information, specially the state of charge, is used for battery behavior study, monitoring, evaluation, quality and failure prevention.

**Keywords:** Lead-acid batteries. State of charge. Data acquisition



## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Modelo de uma célula de baterias de chumbo-ácido. ....	18
<b>Figura 2:</b> Exemplo de grades de uma bateria de chumbo-ácido Bosch. ....	20
<b>Figura 3:</b> Exemplo de um elemento e seus componentes e sua disposição na bateria. ....	21
<b>Figura 4:</b> Relação entre auto-descarga, temperatura e tempo de armazenamento de uma bateria de chumbo-ácido. ....	24
<b>Figura 5:</b> Vida útil em função da temperatura de uma bateria Moura. ....	25
<b>Figura 6:</b> Curvas de carga de baterias VRLA em diferentes taxas de carregamento ((a) 0,8C, (b) 0,5C, (c) 0,4C, (d) 0,3C, (e) 0,2C e (f) 0,1C) utilizando o método de corrente constante .....	27
<b>Figura 7:</b> Curvas de carga em diferentes taxas de carregamento utilizando o método de carga em tensão constante. ....	27
<b>Figura 8:</b> Ilustração da liberação de gases de hidrogênio e oxigênio de uma célula de uma bateria de chumbo-ácido. ....	28
<b>Figura 9:</b> Exemplo de baterias ventiladas. ....	29
<b>Figura 10:</b> Exemplo de uma bateria VRLA. ....	30
<b>Figura 11:</b> Relação entre a tensão de circuito aberto e o estado de carga de uma bateria de chumbo-ácido. ....	32
<b>Figura 12:</b> Curvas de recuperação pós-carga (A) para diferentes taxas de carga e curvas de recuperação pós-descarga (B) para diferentes taxas de descarga. ....	34
<b>Figura 13:</b> Relação linear, genérica, entre o estado de carga e a densidade do eletrólito de uma bateria de chumbo-ácido. ....	35
<b>Figura 14:</b> Diagrama de funcionamento do método de descarga através de resistor de valor fixo. ....	35
<b>Figura 15:</b> Curvas de descarga em resistores de valor fixo. ....	36
<b>Figura 16:</b> Diagrama do método de descarga em corrente constante. ....	37
<b>Figura 17:</b> Curvas de descarga em corrente constante. ....	38
<b>Figura 18:</b> Diagrama geral do sistema. ....	39
<b>Figura 19:</b> Diagrama do circuito eletrônico de descarga em corrente constante. ....	40
<b>Figura 20:</b> Imagem dos resistores do sistema de descarga em corrente constante nos perfis em “U” ..	41
<b>Figura 21:</b> Estrutura de dissipação de calor .....	42
<b>Figura 22:</b> Imagem da montagem para realização dos testes do sistema de descarga em corrente constante. ....	43
<b>Figura 23:</b> Novo sistema de dissipação. ....	45
<b>Figura 24:</b> Diagrama do circuito de condicionamento da tensão de circuito aberto e tensão de descarga. ....	46
<b>Figura 25:</b> Circuito de condicionamento. ....	47
<b>Figura 26:</b> Placa do circuito de condicionamento. ....	48
<b>Figura 27:</b> Circuito microcontrolado. ....	49
<b>Figura 28:</b> Circuito de comunicação. ....	49
<b>Figura 29:</b> Fluxograma do <i>firmware</i> . ....	50
<b>Figura 30:</b> Placa de circuito impresso principal. ....	51
<b>Figura 31:</b> Caixa de montagem para acomodação dos circuitos e estrutura de dissipação. ....	52
<b>Figura 32:</b> Estrutura de pacote de dados do protocolo de comunicação. ....	53
<b>Figura 33:</b> Imagem da aba de configuração do software. ....	55
<b>Figura 34:</b> Imagem da interface principal do software. ....	55
<b>Figura 35:</b> Imagem da montagem utilizada para calibração do sistema. ....	56
<b>Figura 36:</b> Curvas de calibração do ADC para tensão em circuito aberto (A), tensão em descarga (B) e descarga em corrente constante .....	57
<b>Figura 37:</b> Imagem da tela de calibração do software .....	57
<b>Figura 38:</b> Diagrama da montagem dos testes para validação do sistema. ....	59
<b>Figura 39:</b> Curvas de carga da bateria nova (A) e da bateria velha (B). ....	61

<b>Figura 40:</b> Curvas de recuperação pós-carga da bateria nova (A) e da bateria velha (B). .....	62
<b>Figura 41:</b> Curvas de descarga da bateria nova (A) e da bateria velha (B) .....	63
<b>Figura 42:</b> Curvas de corrente de descarga da bateria nova (A) e da bateria velha (B). .....	63
<b>Figura 43:</b> Curvas de recuperação pós-descarga da bateria nova (A) e da bateria velha (B) .....	64

## LISTAS DE TABELAS E QUADROS

<b>Tabela 1:</b> Relação genérica de capacidade em função do tempo de descarga de baterias de chumbo-ácido. .....	23
<b>Tabela 2:</b> Variação de corrente em função do tempo do sistema de descarga em corrente constante. .....	43
<b>Tabela 3:</b> Capacidades das baterias em relação aos valores de corrente de descarga. .....	44
<b>Tabela 4:</b> Faixa de valores de tensão antes e depois do condicionamento de sinal .....	46
<b>Tabela 5:</b> Faixa de valores antes e depois do condicionamento de sinal. ....	47
<b>Tabela 6:</b> Descrição dos componentes dos pacotes de dados. ....	53
<b>Tabela 7:</b> Funções das curvas e parâmetros de calibração .....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UPS – *Uninterruptable power system*

OPA – Observatório de raios cósmicos Pierre Auger

SoC – *State of charge*

VRLA – *Valve regulated lead-acid battery*

AGM – *Absorptive glass mat*

O.C.V – Open circuit voltage

ADC – Analog to digital converter

TTL – Transistor-transistor level

A/D – Analog to Digital

CRC – Controle de redundância cíclica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2.	OBJETIVO ESPECÍFICO .....	16
1.3.	JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
2.1.	BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO .....	17
<b>2.1.1.</b>	<b>Composição e funcionamento das baterias de chumbo-ácido</b> .....	<b>17</b>
2.1.1.1.	Reação no eletrodo negativo.....	18
2.1.1.2.	Reação no eletrodo positivo .....	18
2.1.1.3.	Reação química de carga e descarga .....	19
<b>2.1.2.</b>	<b>Estrutura de uma bateria de chumbo-ácido</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.3.</b>	<b>Características das baterias de chumbo-ácido</b> .....	<b>21</b>
2.1.3.1.	Capacidade da bateria .....	21
2.1.3.2.	Capacidade nominal.....	22
2.1.3.3.	Capacidade e taxa de descarga .....	22
2.1.3.4.	Estado de carga .....	23
2.1.3.5.	Tempo de recuperação .....	23
2.1.3.6.	Auto-descarga .....	24
2.1.3.7.	Vida-útil .....	25
2.1.3.8.	Estratificação.....	25
2.1.3.9.	Sulfatação .....	26
<b>2.1.4.</b>	<b>Recarga das baterias de chumbo-ácido</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.5.</b>	<b>Os diferentes tipos de baterias de chumbo-ácido</b> .....	<b>28</b>
2.1.5.1.	Baterias ventiladas .....	28
2.1.5.2.	Baterias reguladas a válvula .....	29
<b>2.1.6.</b>	<b>Gerenciamento das baterias de chumbo-ácido</b> .....	<b>31</b>
2.2.	MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE CARGA .....	31
<b>2.2.1.</b>	<b>Método de tensão de circuito aberto</b> .....	<b>32</b>
<b>2.2.2.</b>	<b>Método de densidade do eletrólito</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2.3.</b>	<b>Método de descarga através de carga resistiva fixa</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.4.</b>	<b>Método de descarga em corrente constante</b> .....	<b>36</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
3.1.	O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO .....	39

<b>3.1.1.</b>	<b>O sistema de descarga em corrente constante .....</b>	<b>39</b>
3.1.1.1.	O circuito eletrônico de descarga .....	40
3.1.1.2.	A estrutura de dissipação .....	41
3.1.1.3.	Testes do sistema de descarga em corrente constante .....	42
<b>3.1.2.</b>	<b>Circuito de condicionamento de sinal.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.3.</b>	<b>Circuito microcontrolado.....</b>	<b>48</b>
3.1.3.1.	Circuito de comunicação serial.....	49
<b>3.1.4.</b>	<b>Firmware .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.5.</b>	<b>Montagem do sistema.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.6.</b>	<b>Protocolo de comunicação.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.7.</b>	<b>Software .....</b>	<b>54</b>
<b>3.1.8.</b>	<b>Calibração do sistema .....</b>	<b>56</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
4.1.	CARGA.....	60
4.2.	RECUPERAÇÃO PÓS-CARGA .....	61
4.3.	DESCARGA EM CORRENTE CONSTANTE.....	62
4.4.	RECUPERAÇÃO PÓS-DESCARGA .....	64
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As baterias de chumbo-ácido são utilizadas nas mais diversas aplicações, em particular pelo fato de apresentarem boa estabilidade no fornecimento de energia, permitindo um bom número de ciclos de carga e descarga, além de preços moderados. São exemplos de sistemas que utilizam as baterias de chumbo-ácido: centrais de telecomunicação, automóveis, motocicletas, embarcações, sistemas de geração de energia solar e eólica, carros elétricos, cadeiras de rodas elétricas, sistemas ininterruptos de energia (UPS) e entre outros. Muitos desses sistemas são afetados pelo mau desempenho das baterias, no que diz respeito a falhas, envelhecimento e falta de capacidade de retenção de carga (COPETTI. et. al, 2007). A utilização de baterias de chumbo-ácido em sistemas solares, por exemplo, representa grande parte dos custos de implementação de tais instalações (IMHOFF, 2007). Portanto, são de grande importância o conhecimento da qualidade, quantidade e capacidade de retenção de carga das baterias. Uma informação importante sobre as baterias é o seu estado de carga, uma vez que ele representa a quantidade de carga disponível na bateria, dada em porcentagem. Para a determinação do estado de carga existem vários métodos, por exemplo, método de tensão de circuito aberto, determinação da densidade do eletrólito, método da descarga em carga fixa e descarga em corrente constante (COPETTI, 1993).

A proposta deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de fornecer informações importantes para determinação de parâmetros de qualidade para gerenciamento das baterias de chumbo-ácido, são elas: quantidade de carga, tempo de descarga, curva de descarga e curva de carga, tensão de circuito aberto e estado de carga através do método de descarga em corrente constante. Esses parâmetros, principalmente o estado de carga, podem ser utilizados para estimativa de capacidade de retenção de carga, além de permitir, pelo seu monitoramento, a substituição preventiva de baterias antes que as mesmas comecem a falhar e prejudicar as operações.

O Observatório de raios cósmicos Pierre Auger (OPA), localizado em Malargue na Argentina, utiliza baterias de chumbo-ácido em seus sistemas de geração fotovoltaicos, a fim de alimentar o sistema eletrônico dos detectores de superfície (BARBOSA, 2007). O OPA é um bom exemplo de utilização de sistemas

de energia solar, são 1600 sistemas fotovoltaicos distribuídos em 3000 Km<sup>2</sup>. Nesse sistema as baterias operam em condições de grande variação de temperatura, uma característica da região, que apresenta períodos de baixa temperatura, durante o inverno, e alta temperatura, durante o verão (BARBOSA, 2007). Uma falha das baterias prejudica o desempenho dos detectores e gera custos de substituição em terreno de difícil acesso. Sendo assim, paralelamente ao trabalho que deu lugar a esta dissertação, outros sistemas muito similares foram desenvolvidos pelo Laboratório de Propriedades Óticas (LAPO) do IF-UFBA, em parceria com o Laboratório de Instrumentação e Energia Solar da Universidade Estadual de Feira de Santana, com o *Grupo de Aplicaciones Energeticas y Sostenibles (SEAG)* da Universidade de Santiago de Compostela, Espanha e com o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). A intenção foi dotar o OPA de um sistema capaz de determinar a qualidade de suas baterias.



## 1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de aquisição de dados composto de hardware e software capaz de obter valores de tensão e corrente em descarga e tensão em circuito aberto de baterias de chumbo-ácido.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar, desenvolver e montar circuito eletrônico a fim de realizar a descarga da bateria em corrente constante;
- Projetar, desenvolver e montar circuito eletrônico a fim de realizar aquisição de valores de tensão da bateria em circuito aberto e em descarga. E valores de corrente;
- Montar um sistema para dissipação de calor gerado pelo fluxo de corrente em resistores;
- Projetar, desenvolver e montar circuito eletrônico composto por um microcontrolador para aquisição de dados e comunicação via padrão RS – 232;
- Desenvolvimento de um protocolo de comunicação baseado no protocolo Modbus em firmware do microcontrolador;
- Desenvolvimento do protocolo de comunicação no software gerenciador do sistema desenvolvido em linguagem de programação C#;
- Realização de testes do sistema;
- Aquisição e análise de dados;

## 1.3. JUSTIFICATIVA

Sistemas que utilizam baterias de chumbo-ácido são afetados pelo mau desempenho destes dispositivos, seja em relação a falhas, ao envelhecimento ou a falta de capacidade de retenção de carga. Dessa forma é indispensável o conhecimento da qualidade, quantidade e capacidade de retenção de carga das baterias.

A proposta deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de fornecer dados importantes para obtenção do estado de carga e curvas de: carga, de recuperação pós-carga, pós-descarga e de descarga. Essas informações são importantes para o gerenciamento de baterias.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Baterias bem gerenciadas têm uma maior vida-útil, o que favorece o bom desempenho em diferentes aplicações. Em sistemas fotovoltaicos, por exemplo, as baterias são responsáveis pelo fornecimento constante de energia e segundo COPETTI (2007), boa parte das falhas se deve as baterias, seja pelo mau dimensionamento ou pelo mau uso.

Assim, tentar melhorar o desempenho das baterias através do seu gerenciamento passa a ser uma necessidade, para isso é necessário conhecer suas características funcionais e de operação.

As baterias são dispositivos baseados em reações químicas de oxidação e redução utilizadas para o armazenamento e fornecimento de energia elétrica. Isto é, elas convertem energia elétrica em energia química durante o armazenamento (carga) e convertem energia química em energia elétrica durante o fornecimento (descarga).

As baterias são carregadas, por exemplo, quando conectadas a um carregador e a corrente elétrica é forçada para dentro delas. E são descarregadas, quando conectadas a uma carga, por exemplo, um circuito eletrônico ou aparato elétrico

### 2.1. BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

#### 2.1.1. Composição e funcionamento das baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido são compostas por células e eletrólito. Cada célula é composta por um eletrodo positivo e um eletrodo negativo. O eletrodo positivo é geralmente composto de dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ), o negativo composto por chumbo ( $Pb$ ) e o eletrólito por uma solução diluída em água de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) (HUGGINS, 2010). O dióxido de chumbo e o chumbo também são conhecidos como matérias da ativas dos eletrodos. A partir das reações químicas realizadas entre os eletrodos e o eletrólito são geradas ou armazenadas cargas elétricas. O que dá lugar uma diferença de potencial associada a cada eletrodo. Na Figura 1 pode ser visto um exemplo básico de uma célula de uma bateria de chumbo-ácido conectada a uma carga e fornecendo corrente elétrica.

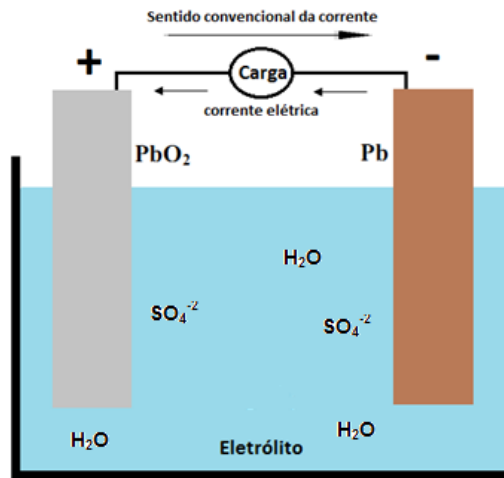


Figura 1. Modelo de uma célula de baterias de chumbo-ácido.

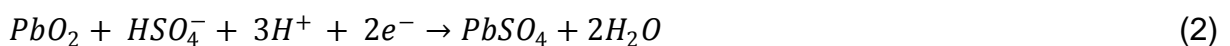
#### 2.1.1.1. Reação no eletrodo negativo

A reação no eletrodo negativo se dá a partir da reação do chumbo ( $Pb$ ) com o ( $HSO_4^{2-}$ ) presente no eletrólito, assim é gerado sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ),  $H^+$  e dois elétrons. A diferença de potencial dessa reação é de 0,356 V. A reação é expressa partir da equação (1).



#### 2.1.1.2. Reação no eletrodo positivo

No eletrodo positivo a reação é realizada entre o dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) do eletrodo e o  $HSO_4^-$  e  $3H^+$  presentes no eletrólito, e os 2 elétrons gerados através da reação no eletrodo negativo. Portanto, é gerado sulfato de chumbo  $PbSO_4$  e  $2H_2O$ . A diferença de potencial nessa reação é de 1,685 V. A equação (2) expressa essa reação.



A diferença de potencial resultante entre os eletrodos, positivo e negativo, é de 2.041 Volts, sendo a soma do potencial de 1.685 Volts do eletrodo positivo com 0.356 Volts do eletrodo negativo.

### 2.1.1.3. Reações químicas de carga e descarga

Durante a descarga da bateria a matéria ativa do eletrodo positivo sofre redução de  $PbO_2$  para  $PbSO_4$  e a matéria ativa do eletrodo negativo sofre oxidação do  $Pb$ , e passa a ser  $PbSO_4$ . Durante a carga, no eletrodo positivo ocorre a oxidação do  $PbSO_4$ , que dá lugar ao  $PbO_2$  enquanto que no eletrodo negativo ocorre a redução do  $PbSO_4$  em  $Pb$  (LUCZKIEWICZ, 2011).

As reações químicas de carga e descarga são expressas pela equação (3), sendo que a reação de carga pode ser lida da esquerda para a direita, enquanto que a descarga é representada da direita para a esquerda.



Além dessas reações fundamentais, existem outras reações que ocorrem nos eletrodos, assim: a água é decomposta e gases como o hidrogênio e o oxigênio são gerados. Isso ocorre devido à eletrólise da água durante a descarga, numa eventual sobrecarga, ou mesmo durante a auto-descarga (SCHIEMAN, 2008). Por exemplo, no eletrodo positivo há a geração de oxigênio e no eletrodo negativo ocorre a geração de hidrogênio, como expresso nas equações (4) e (5).



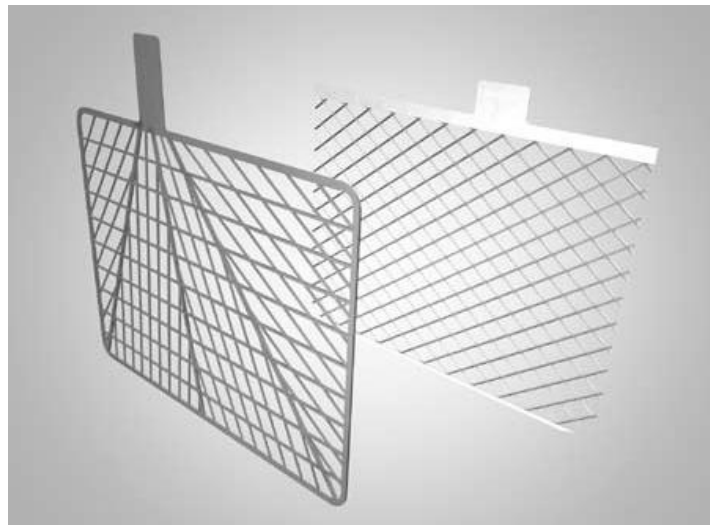
### 2.1.2. Estrutura de uma bateria de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido comerciais possuem uma estrutura interna composta por células individuais. Cada uma delas produz uma diferença de

potencial de aproximadamente 2 V. A montagem destas células em série define o potencial nominal da bateria.

As células são compostas por placas positivas, placas negativas, matéria ativa positiva e negativa, grades e separadores. Em algumas baterias comerciais um conjunto de células é chamado de elemento, que por sua vez um conjunto de elementos em série compõe a bateria (BOSCH, 2012).

A grade é responsável por suportar a matéria ativa e conduzir corrente elétrica (MOURA, 1996). Ela é geralmente composta por uma estrutura metálica de chumbo ou de chumbo ligado a outros elementos. As ligas são feitas, por exemplo, de chumbo-antimônio ( $PbSb$ ), de chumbo-cálcio ( $PbCa$ ) e de chumbo-cálcio-prata ( $PbCaAg$ ). Esses outros elementos são ligados ao chumbo a fim de melhorar o desempenho da bateria em relação à operação em mais alta temperatura e melhorar a condutividade elétrica. A Figura 2 mostra um exemplo de grade do fabricante Bosch.



**Figura 2.** Exemplo de grades de uma bateria de chumbo-ácido Bosch.

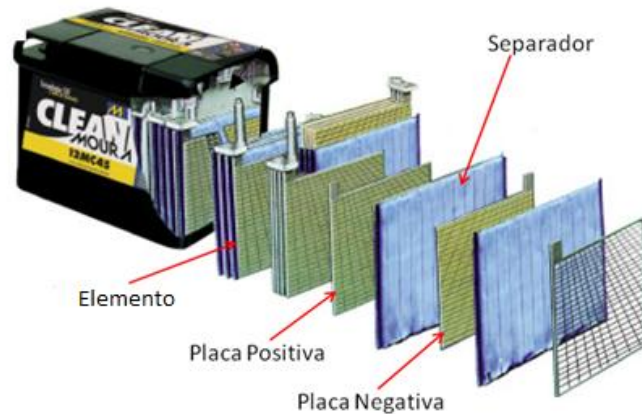
**Fonte:** (BOSCH, 2012)

A matéria ativa positiva é composta por dióxido de chumbo e a negativa por chumbo. A placa positiva é composta pela grade e pela matéria ativa positiva, enquanto que a placa negativa é composta pela grade e pela matéria ativa negativa.

Os separadores são utilizados para manter a distância entre as placas de polaridades opostas, assegurando que estas estejam eletricamente isoladas, a fim

de evitar curto circuito. Além disso, os separadores devem ser resistentes ao ácido, devem assegurar a circulação do eletrólito e o transporte iônico.

A Figura 3 mostra a estrutura interna de uma bateria de chumbo-ácido de fabricação Moura Brasil.



**Figura 3.** Exemplo de um elemento e seus componentes e sua disposição na bateria.  
**Fonte:** (MOURA, 2012)

### 2.1.3. Características das baterias de chumbo-ácido

#### 2.1.3.1. Capacidade da bateria

A capacidade de uma bateria é a medida da quantidade de corrente elétrica que ela pode fornecer durante o tempo. Ela é expressa em Ampere-hora (Ah), sendo o produto da corrente pelo tempo de descarga da bateria em horas. Por exemplo, supostamente uma bateria de 10 Ah pode fornecer 2 A durante 5 horas,. Durante este procedimento a tensão da bateria progressivamente diminui até um ponto em que é considerada descarregada.

Existem baterias das mais variadas capacidades, por exemplo: 7 Ah, normalmente utilizadas em *nobreaks*, 45 Ah, 60 Ah e 75 Ah bastante utilizadas em automóveis, entre outras.

### 2.1.3.2. Capacidade nominal

A capacidade nominal é a quantidade de energia armazenada por uma bateria nova, ou seja, nunca antes usada (BOSCH, 1996). No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 14205, define a obtenção da capacidade nominal de uma bateria através da sua descarga a corrente constante correspondente a 10% do valor de capacidade da bateria durante 10 horas, estando à bateria entre 20 e 30 °C.

### 2.1.3.3. Capacidade e taxa de descarga

Uma bateria de chumbo-ácido de 105 Ah supostamente deve fornecer 105 Amperes de corrente durante 1 hora, ou, 21 Amperes durante 5 horas, entretanto, isso não ocorre. A capacidade de uma bateria de chumbo-ácido é influenciada diretamente pela sua taxa de descarga, ou seja, se a descarga é feita de forma lenta ou rápida. A taxa de descarga é definida pela intensidade de corrente de descarga.

Uma maneira de se representar a taxa de descarga, é através da notação  $C/n$ , onde,  $C$  representa a capacidade da bateria e  $n$  o tempo de descarga em horas. Assim, uma bateria de 100 Ah de capacidade descarregada a  $C/4$ , supostamente irá fornecer 25 A durante 4 horas. Ou ainda,  $0.5C$ , onde supostamente irá fornecer 50 A durante 0.5 horas. Vale ressaltar que esse tipo de notação também é utilizada para taxa de carga.

Para a descarga de uma bateria em regime de grande intensidade de corrente a capacidade será menor do que uma descarga em pequenas intensidades. Isso ocorre devido à velocidade de difusão do eletrólito (SINCLAIR, 1998). Em descargas lentas há maior tempo para difusão e aproveitamento do eletrólito, resultando em maior capacidade disponível (LUCZKIEVIZ, 2011).

Além disso, durante a descarga o sulfato de chumbo, que se acumula nas placas, aumenta a resistência interna da bateria, dificultando a passagem de corrente (MOURA 1996). A Tabela 1 mostra a relação típica entre a taxa de descarga e capacidade disponível de baterias de chumbo-ácido em geral de qualquer capacidade.

**Tabela 1.** Relação genérica de capacidade em função do tempo de descarga de baterias de chumbo-ácido.

Tempo de descarga (Horas)	Capacidade
0.2	44%
1	72%
5	92%
10	100%
20	108%

Fonte: (ENERGY, 2000)

#### 2.1.3.4. Estado de carga

O estado de carga (SoC), do inglês *state of charge*, indica a quantidade de energia disponível na bateria, dada em por cento. Ele também é definido como sendo a medida de quanto à bateria possui de carga em comparação com a sua capacidade nominal (LUCZKIEVICZ, 2011).

O SoC pode ser obtido a partir da equação (6), onde  $Q$  é quantidade de carga computada durante um ciclo de descarga e  $Q_0$  é quantidade de carga desta mesma bateria quando nova, ou seja, nunca antes usada.

$$SoC = \frac{Q}{Q_0} \times 100\% \quad (6)$$

#### 2.1.3.5. Tempo de recuperação

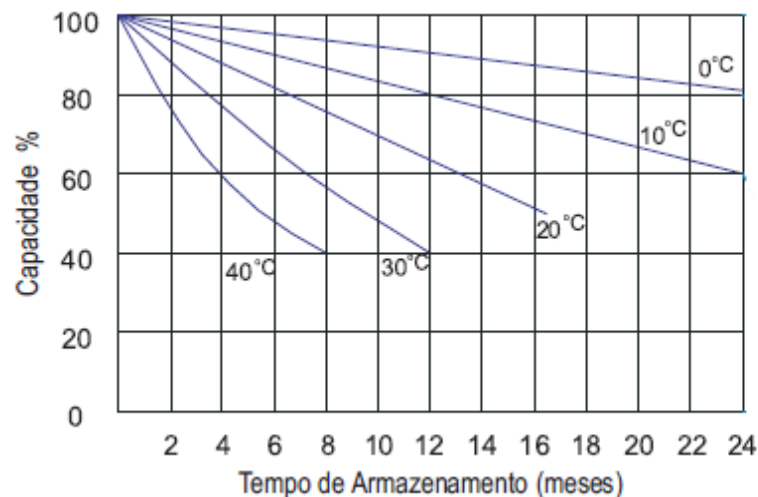
O período em que a bateria não está sendo carregada, nem descarregada, é chamado de tempo de recuperação (MISCHIE, 2008). Alguns fabricantes de baterias recomendam que elas permaneçam em recuperação, após a carga, por períodos entre 4 a 24 horas (BOSCH, 2013). Na literatura são reportados trabalhos estudando o tempo de recuperação. Mischie (2008), por exemplo, mostra que se durante uma descarga onde são efetuados períodos de recuperação, a bateria fornece um valor de carga próximo do valor teórico, ou seja, estado de carga igual a 100%. Em um dos experimentos reportados por este autor, uma bateria de chumbo-ácido de 3.3 Ah de capacidade forneceu 3.036 Ah, ou seja, 92% da capacidade nominal da bateria.



Maiores informações como tipo de bateria e histórico de carga e descarga não foram informados.

#### 2.1.3.6. Auto-descarga

Auto-descarga é a perda de carga que a bateria sofre quando não está em operação, ou seja, quando não está conectada a uma carga externa. Ela ocorre devido a descargas provocadas por: processos internos como reações químicas entre o eletrólito e impurezas, ou pelo aumento da temperatura do ambiente de armazenamento, ou ainda, pelo envelhecimento da bateria. O antimônio utilizado nas grades das células das baterias é um exemplo de impureza que faz com que haja um aumento na taxa de auto-descarga (BOSCH, 2013). O aumento da temperatura faz com que haja aumento na auto-descarga uma vez que acelera as reações eletroquímicas da bateria (ENERGY, 2000). A Figura 4 mostra um gráfico da relação entre temperatura e auto-descarga de uma bateria de fabricação *ATM power*. A partir do gráfico pode ser visto claramente que o aumento da temperatura favorece a perda de capacidade.



**Figura 4.** Relação entre auto-descarga, temperatura e tempo de armazenamento de uma bateria de chumbo-ácido.

**Fonte:** (ATM Power, 2011)

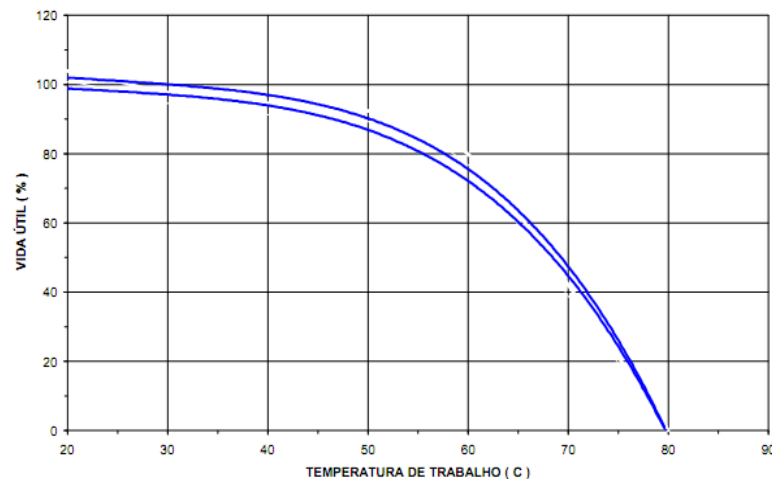
O tempo de armazenamento também influencia na auto-descarga. A bateria não deve permanecer por longos períodos sem uso, ou seja, quanto mais tempo

armazenada maior a perda de carga. Na Figura 4 pode ser visto a influência do tempo de armazenamento na auto-descarga.

### 2.1.3.7. Vida-útil

A vida-útil de uma bateria é o tempo durante o qual ela é capaz de fornecer mais de 80% de sua capacidade nominal (ENERGY, 2000). Outra maneira de se expressar a vida-útil é através da quantidade de ciclos de carga e descarga que uma bateria é capaz de ser submetida.

Alguns fatores influenciam na vida-útil de uma bateria de chumbo-ácido, por exemplo: temperatura e profundidade das descargas. Em altas temperaturas a taxa de corrosão interna da bateria aumenta, acarretando a diminuição da sua vida-útil (SINCLAIR, 1998). A Figura 5 mostra o gráfico da vida-útil da bateria em função da temperatura, nele pode ser observado que a região de operação da bateria referente à maior vida-útil é entre 20 e 30 °C.



**Figura 5.** Vida útil em função da temperatura de uma bateria Moura.

**Fonte:** (<http://manoel.pesqueira.ifpe.edu.br/fmn/anterior/2010.2/infra/CLEAN.PDF>)

### 2.1.3.8. Estratificação

À medida que a bateria é a reação química de descarga, o ácido sulfúrico é convertido em água. Como o ácido é mais denso que a água, a sua tendência é se

acumular no fundo da bateria, provocando a não homogeneidade, ou, a estratificação do eletrólito. Esse efeito causa a redução da capacidade da bateria.

Uma das soluções para esse problema é a agitação mecânica, onde a vibração promove a mistura do eletrólito. Outra solução é a gaseificação ocorrida durante a sobrecarga, onde os gases promovem a mistura do eletrólito e assim sua homogeneização, o que por sua vez, promove a recuperação da perda de capacidade (CATHERINO, 2004). Esses procedimentos devem ser realizados com precaução uma vez que uma bateria sob sobrecarga pode sofrer corrosão nas grades (RUETSCHI, 2004).

#### 2.1.3.9. Sulfatação

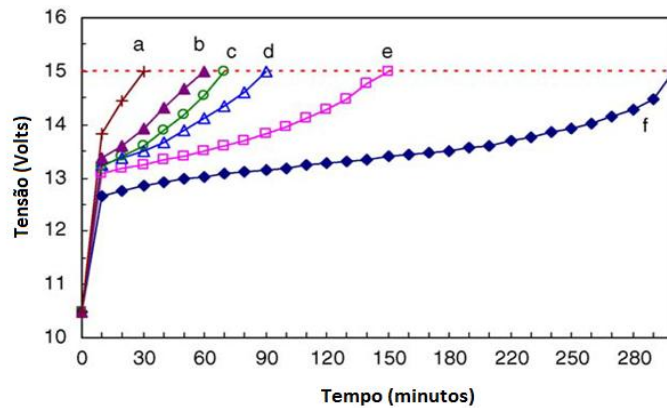
Sulfatação é o processo de recristalização do sulfato de chumbo em uma forma que representa dificuldade de se converter na matéria ativa dos eletrodos. Este fato ocasiona o aumento da resistência interna da bateria e por sua vez a diminuição de sua capacidade (COPETTI, 1993). Algumas causas da sulfatação são o armazenamento da bateria por longos períodos descarregada, sua operação em descarga profunda e a carga completa não realizada. O processo de estratificação pode causar sulfatação.

#### 2.1.4. **Recarga das baterias de chumbo-ácido**

Existem alguns métodos para carga das baterias de chumbo-ácido, os mais conhecidos são o método de corrente constante e o método de tensão constante. Existem também métodos que utilizam estes dois procedimentos em conjunto. O tipo de método a ser utilizado depende da aplicação e do tempo disponível para a carga.

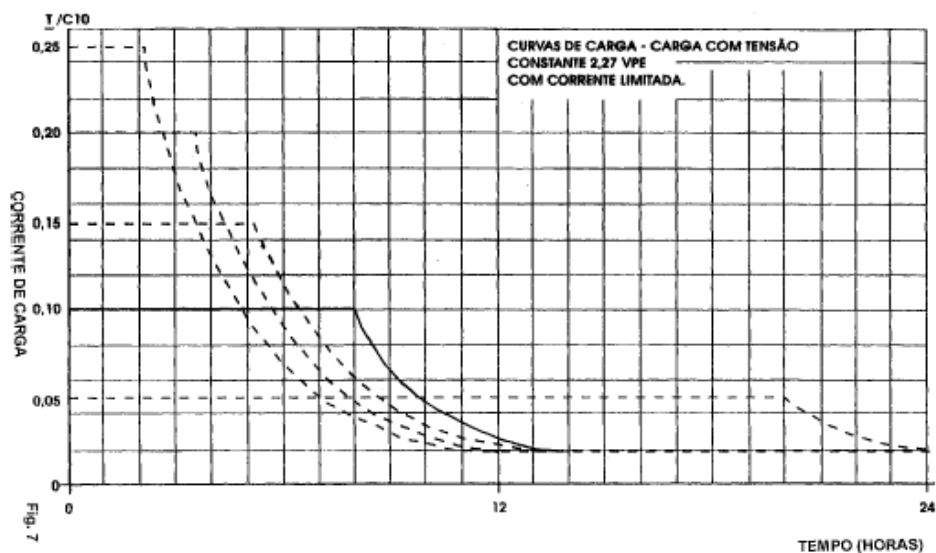
O método de corrente constante consiste em carregar à bateria a partir da aplicação, em seus bornes, de corrente elétrica de valor constante em relação ao tempo, como consequência a tensão da bateria varia até ponto onde ela pode ser considerada carregada (YAN, 2006). A Figura 6 mostra curvas de carga neste regime, onde pode ser visto o comportamento da tensão da bateria. Esta grandeza aumenta a medida que o tempo passa até atingir o valor de tensão de fim de carga, que nesse caso foi de 15 volts. Cada curva representa a carga de uma bateria do

tipo VRLA em uma taxa de carregamento, onde (a) 0,8C, (b) 0,5C, (c) 0,4C, (d) 0,3C, (e) 0,2C e (f) 0,1C (YAN, 2006).



**Figura 6.** Curvas de carga de baterias VRLA em diferentes taxas de carregamento ((a) 0,8C, (b) 0,5C, (c) 0,4C, (d) 0,3C, (e) 0,2C e (f) 0,1C) utilizando o método de corrente constante.  
**Fonte:** (YAN, 2006)

O método de tensão constante consiste em aplicar uma tensão na bateria mantendo-a constante, como conseqüência o valor de corrente fornecida varia no tempo. Inicialmente, a corrente é alta e diminui com passar do tempo. A Figura 7 mostra curvas de carga em diferentes taxas de carregamento, onde pode ser visto o comportamento da corrente durante a carga.



**Figura 7.** Curvas de carga em diferentes taxas de carregamento utilizando o método de carga em tensão constante.

**Fonte.** (<http://www.enersystem.com/pmanuales/EVR.pdf>)

O método de carga em corrente constante pode resultar em gaseificação e aquecimento da bateria (CDTECHNO, 2013). Dessa forma, para tipos de baterias onde a temperatura de operação necessita de maior atenção, o método de carga em tensão constante é mais adequado.

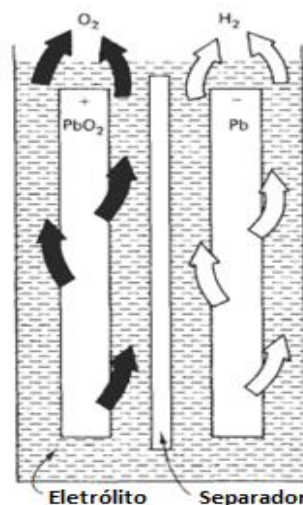
## 2.1.5. Os diferentes tipos de baterias de chumbo-ácido

### 2.1.5.1. Baterias ventiladas

As baterias ventiladas (*Vented Lead-Acid*), também conhecidas como *Flooded*, possuem eletrólito, solução de ácido sulfúrico diluído em água destilada, na forma líquida, como as que têm sido tratadas até agora.

Durante as reações eletroquímicas, gases como oxigênio e hidrogênio são liberados, esses gases, corrosivos e tóxicos, são jogados no ambiente. À medida que os gases são emitidos a quantidade de água no eletrólito diminui. Dessa forma, para que haja restabelecimento do eletrólito, água deve ser recolocada na bateria (ENERGY, 2000).

Uma parte do calor gerado na bateria, devido às reações eletroquímicas, é dissipada juntamente com os gases, o que favorece uma boa troca de calor com o ambiente, o que favorece o desempenho da bateria do ponto de vista de temperatura de operação. Na Figura 8 é apresentado o caminho de liberação dos gases (hidrogênio e oxigênio) para o ambiente.



**Figura 8.** Ilustração da liberação de gases de hidrogênio e oxigênio de uma célula de uma bateria de chumbo-ácido.

**Fonte:** (CROMPTON, 2000).

Estes tipos de baterias geralmente devem ser instaladas em ambientes com ventilação que permitam a liberação de gases. A Figura 9 mostra duas baterias ventiladas do fabricante *Hoppecke*®.



**Figura 9.** Exemplo de baterias ventiladas.

**Fonte:** (HOPPECKE, 2012)

#### 2.1.5.2. Baterias reguladas a válvula

As baterias do tipo reguladas por válvulas, VRLA (*Valve-Regulated Lead-Acid*), foram criadas com intuito de reduzir a emissão de gases gerados pelas baterias do tipo ventiladas e acabar com a necessidade de adição de água.

Esse tipo de bateria permite a recombinação dos gases liberados durante as reações eletroquímicas (oxigênio e hidrogênio) gerando água.

No eletrodo positivo ocorre a recombinação do hidrogênio, como explicita a equação (7), enquanto que no eletrodo negativo ocorre a recombinação do oxigênio, como expressa a equação (8) (GU. W, 2002).



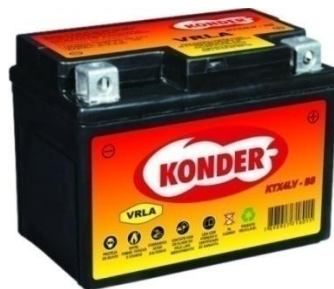
Duas tecnologias facilitam o processo recombinação dos gases, o uso de um **gel** no lugar do eletrólito líquido, ou o processo conhecido como **absorptive glass mat** (AGM) (HUGGINS, 2010).

- **Gel** – baterias VRLA baseadas nessa tecnologia utilizam o eletrólito com adição de sílica, isso faz com que ele fique mais espesso e imobilizado na forma de gel. Os gases migram entre os eletrodos através de fissuras presentes neste material.
- **AGM** – esse tipo de tecnologia consiste em utilizar separadores para imobilizar o eletrólito. Eles são compostos por microfibras de vidro com alta porosidade e molhabilidade, o que permite alta absorção de ácido e baixa resistência elétrica. Os gases migram entre eletrodos através de espaços nos separadores.

Devido à maior eficiência no processo de recombinação, não há perda de água, evitando assim a necessidade de reposição. Por isso, esse tipo de bateria é conhecido como livre de manutenção.

A não liberação dos gases faz com que haja aumento da pressão interna da bateria, assim uma válvula é utilizada para manter a pressão dentro das especificações de segurança, por isso são chamadas de baterias reguladas à válvula.

Diferente das baterias ventiladas, nas baterias VRLA, boa parte do calor gerado é mantido na bateria, assim deve ser dada maior atenção à temperatura de operação destes dispositivos. A Figura 10 mostra um exemplo de bateria regulada a válvula utilizada em motocicletas do fabricante *Konder*®.



**Figura 10.** Exemplo de uma bateria VRLA.

**Fonte:** (www.konder.com.br, 2012)

### 2.1.6. Gerenciamento das baterias de chumbo-ácido

Vários fatores devem ser levados em consideração quando se utiliza baterias de chumbo-ácido: estado de carga, temperatura de operação, auto-descarga, resistência interna, tensão de circuito aberto, densidade do eletrólito e taxa de carga e descarga. O conhecimento e a devida análise desses fatores fazem com que as baterias sejam utilizadas com maior eficiência e segurança.

O estado de carga (SoC) é um parâmetro bastante utilizado no gerenciamento e monitoramento das baterias de chumbo-ácido, como exemplo:

- **Sistemas fotovoltaicos** – o SoC é utilizado pelos reguladores a fim de evitar a sobrecarga e a sobredescarga. Também pode ser usado para verificar a capacidade de retenção de carga de baterias novas, antes das mesmas serem colocadas em operação.
- **Cadeira de rodas elétrica** – o SoC é usado com o intuito de manter o usuário informado sobre a carga da bateria, evitando assim que a cadeira pare por falta de carga (AYLOR, 1992).
- **Sistemas de backup de energia para telecomunicações** – o SoC é utilizado para monitoramento da carga das baterias, que não podem falhar no fornecimento de energia alternativa na ausência da fonte de energia principal, que quase sempre é a rede elétrica local.
- **Veículos elétricos** – o SoC é usado na predição do momento abastecimento e troca das baterias e assim evitar falha de funcionamento do veículo (SINCLAIR, 1998).

## 2.2. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE CARGA

O estado de carga pode ser estimado por diferentes métodos: pela medida de densidade do eletrólito, pela medida da tensão de circuito aberto, por espectroscopia de impedância química, pela medida da resistência interna, pela descarga em uma

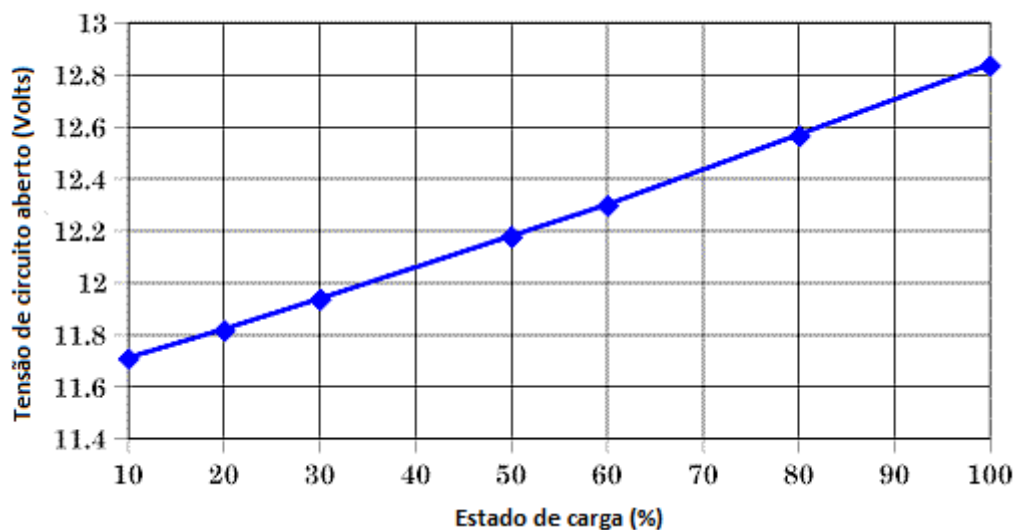


carga resistiva fixa ou descarga em corrente constante (PILLER, 2001). Neste trabalho alguns destes serão abordados.

### 2.2.1. Método de tensão de circuito aberto

O método de tensão de circuito aberto, (O.C.V) do inglês *Open Circuit Voltage*, consiste em medir a tensão da bateria quando a mesma não está em operação, ou seja, em circuito aberto. Após a medição, o valor de tensão é aplicado em um gráfico de tensão versus estado de carga obtendo, assim, o estado de carga da bateria testada. Este gráfico de O.C.V versus estado de carga deve ser obtido através do fabricante da bateria.

Contudo, para determinação do estado de carga com acurácia, a medida da tensão de circuito aberto deve ser realizada após a bateria ter permanecido em repouso, após a carga ou a descarga. Esse valor de tensão de circuito aberto é conhecido como tensão de circuito aberto estável (MISCHIE, 2008). O tempo de repouso é, geralmente, um dado fornecido pelo fabricante da bateria. Caso isso não ocorra, a norma NBR 14205 da Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT) indica um repouso de no mínimo 4 horas e no máximo 24 horas após a carga. A Figura 11 mostra um gráfico da relação entre a tensão de circuito aberto e o estado de carga de uma bateria de chumbo-ácido de fabricação Odyssey®.



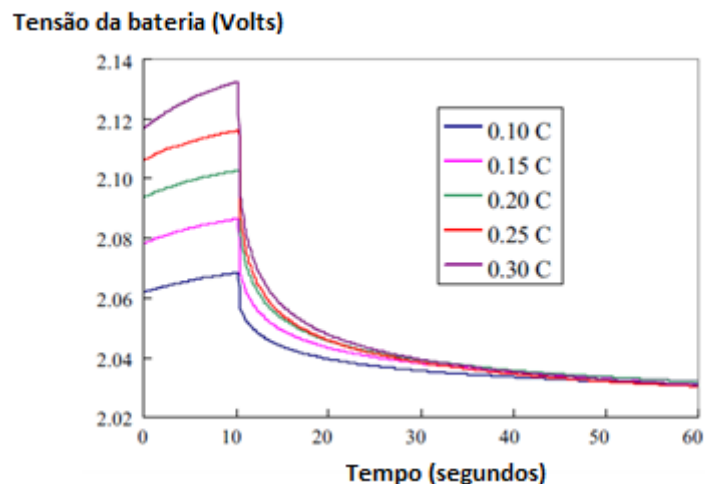
**Figura 11.** Relação entre a tensão de circuito aberto e o estado de carga de uma bateria de chumbo-ácido.

**Fonte:** (<http://www.odysseysoutheast.com/storage-recharge.php>)

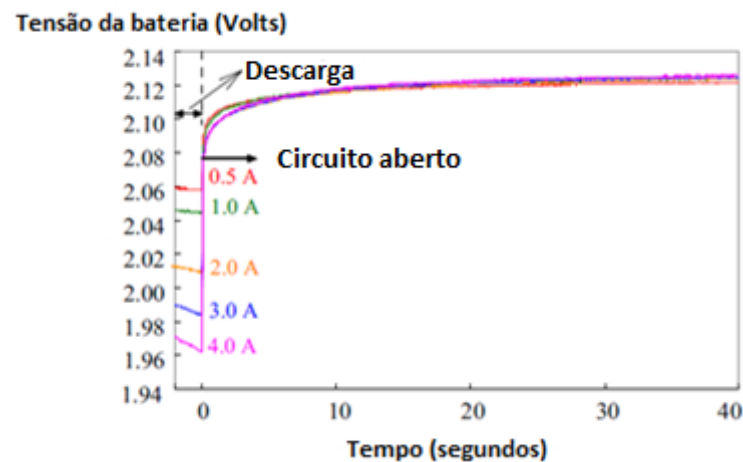
A observação da tensão de circuito aberto, feitas de modo sistemático, permite traçar a curva de recuperação da bateria, tanto após a carga, quanto após a descarga. Essas curvas podem ser utilizadas para determinação da tensão de circuito aberto estável. Aylor, (1992), utiliza um método para determinação da tensão de circuito aberto estável a partir das curvas de recuperação de baterias de chumbo-ácido utilizadas em cadeiras de rodas elétricas. Este autor propõe um método no qual se pode prever a tensão de circuito aberto estável antes mesmo de decorrido o tempo total. Para isso as curvas de recuperação são utilizadas.

Ng et. al (2008), utilizam as curvas de recuperação pós-carga e pós-descarga para mostrar a influencia da descarga e recarga anteriores no valor da tensão de circuito aberto de células de baterias.

A Figura 12(a) mostra o gráfico típico de curvas de recuperação pós-carga para diferentes taxas de carga, as curvas de recuperação começam a partir dos 10 segundos. A Figura 12(b) mostra curvas pós-descarga para diferentes taxas de descarga, a curva de recuperação é dada a partir do tempo zero. Tanto as curvas de recuperação pós-carga, quanto pós-descarga são referentes a uma célula de uma bateria de chumbo-ácido.



(A)



(B)

**Figura 12.** Curvas de recuperação pós-carga (A) para diferentes taxas de carga e curvas de recuperação pós-descarga (B) para diferentes taxas de descarga.

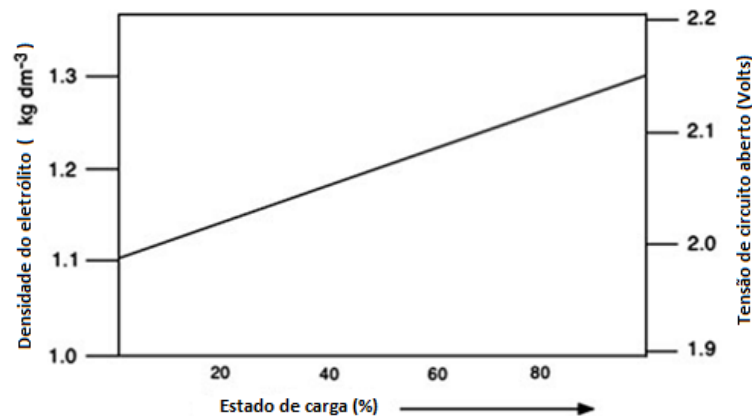
Fonte: (NG et. al, 2008).

### 2.2.2. Método de densidade do eletrólito

A concentração do ácido sulfúrico diminui à medida que a bateria é descarregada e a densidade do eletrólito varia de forma linear em relação ao estado de carga. Desta forma, pode-se estimar o estado de carga através das medidas de densidade.

As medidas de densidade podem ser realizadas pela determinação da concentração de íons, condutividade, resistividade, etc (LUCZKIEVICZ, 2011). O problema desse método é a não homogeneidade do eletrólito, devido à estratificação, o que pode afetar as medidas. Recomenda-se que para utilização deste método, antes se certifique de minimizar o efeito da estratificação.

A desvantagem desse método se dá pelo fato de que é somente utilizado em baterias nas quais é possível retirar uma alíquota de eletrólito com a bateria fora de operação, ou seja, em circuito aberto (DEEPTI, 2006). A Figura 13 mostra um gráfico genérico da relação entre a densidade do eletrólito e o estado de carga.

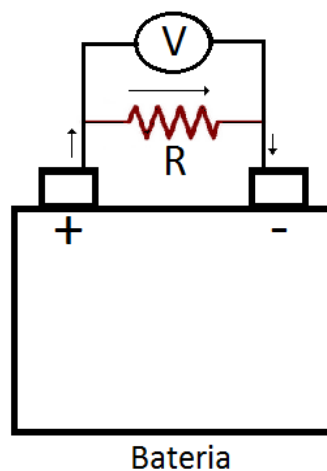


**Figura 13.** Relação linear, genérica, entre o estado de carga e a densidade do eletrólito de uma bateria de chumbo-ácido.

Fonte: (ENERGY, 2000).

### 2.2.3. Método de descarga através de resistor de valor fixo

Neste método é feita a descarga da bateria utilizando um resistor de valor fixo, assim, a corrente de descarga integrada no tempo é igual quantidade de carga disponível na bateria. Este número é então aplicado em uma expressão, que permite estimar do estado de carga (BARBOSA. *et.al*, 2007). A Figura 14 mostra um diagrama que ilustra o processo.



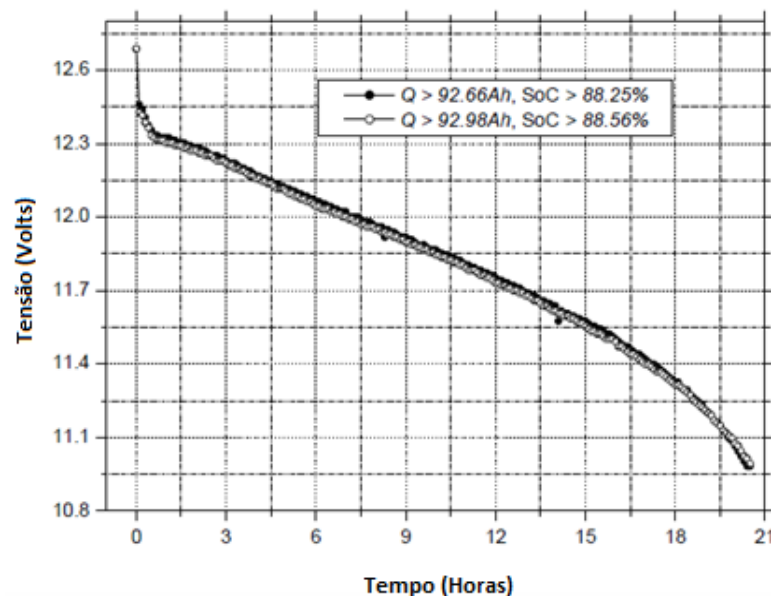
**Figura 14.** Diagrama de funcionamento do método de descarga através de resistor de valor fixo.

Os valores de tensão monitorados durante a descarga, aplicados à equação (9), determinam indiretamente a quantidade de carga  $Q$ . Sendo  $t_0$  o instante inicial

da descarga e  $t_{max}$  o tempo final, ou seja, o instante em que a tensão da bateria atinge um valor limite, a partir do qual a bateria é considerada descarregada.

$$Q = \int_{t_0}^{t_{max}} I(t) dt = \int_{t_0}^{t_{max}} \frac{V(t)}{R} dt = \frac{1}{R} \int_{t_0}^{t_{max}} V(t) dt \quad (9)$$

Depois de obtida a quantidade de carga  $Q$ , o estado de carga pode ser calculado através da equação (6). A figura 15 mostra um gráfico contendo curvas típicas de descarga em resistores de valor fixo. No gráfico podem ser vistas as quantidades de carga  $Q$  e respectivos valores de estados de carga (SoC) calculados.



**Figura 15.** Curvas de descarga em resistores de valor fixo.

**Fonte:** (BARBOSA, 2007)

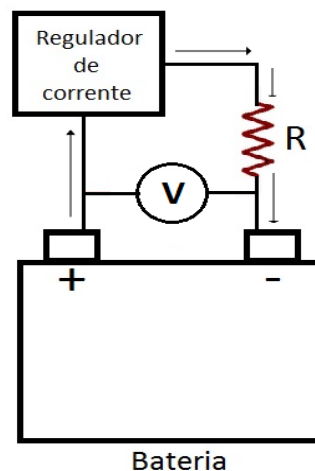
Esse método pode ser utilizado em aplicações onde o monitoramento em tempo real das baterias se impõe, isto é, o método é utilizado com a bateria em operação, ou seja, sem a necessidade de desconectá-la.

#### 2.2.4. Método de descarga em corrente constante

O método de descarga em corrente constante consiste em submeter à bateria a uma descarga forçada através de uma resistência dinâmica, e assim manter a

corrente de descarga constante, independente da queda de tensão. A partir do valor da corrente de descarga e do tempo gasto nesta operação é calculada a quantidade de carga fornecida pela bateria e consequentemente o estado de carga.

Para simular a resistência dinâmica e manter a corrente constante, um regulador de corrente pode ser utilizado. A Figura 16 mostra o diagrama de funcionamento do método.



**Figura 16.** Diagrama do método de descarga em corrente constante.

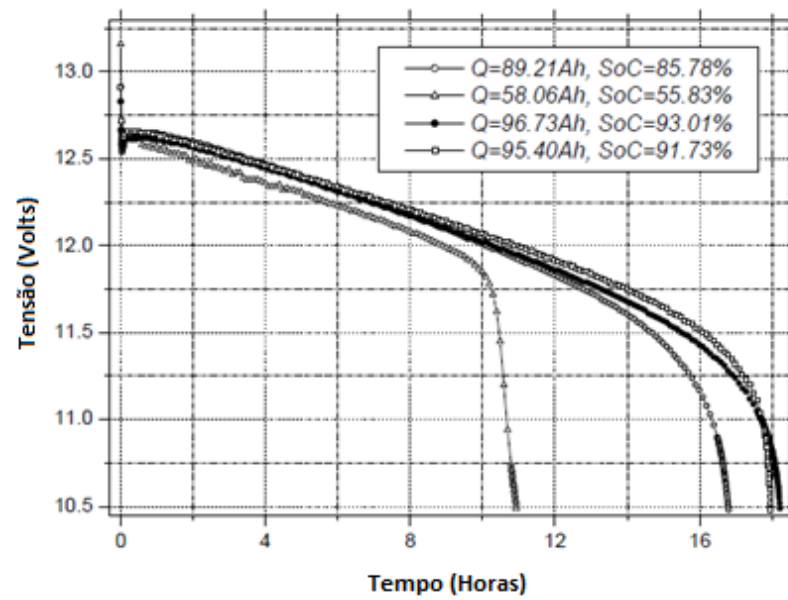
Como no método anterior, durante a descarga os valores de tensão são medidos, possibilitando esboçar a curva de descarga da bateria em função do tempo. Essa curva é importante na análise do comportamento da tensão da bateria durante a descarga.

Para se obter a quantidade de carga são aplicados na equação (10) os valores da corrente constante de descarga ( $I$ ) e do tempo de descarga ( $\Delta t$ ) (BARBOSA. *et.al*, 2007), o estado de carga é obtido aplicando o valor calculado pela equação (10) na equação (6).

$$Q = I\Delta t \quad (10)$$

A Figura 17 mostra um exemplo de curvas de descarga das baterias estacionárias de fabricação Moura®, da linha Clean, com capacidade de 105 Ah.

Nela podem ser vistas as quantidades de carga (Q) e os respectivos valores de estados de carga (SoC).



**Figura 17.** Curvas de descarga em corrente constante.

**Fonte:** (BARBOSA, 2007).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

O sistema é composto por componentes mecânicos, eletrônicos e software, podendo ser dividido em quatro partes: o sistema de descarga em corrente constante, o circuito de condicionamento de sinal, o circuito aquisição de dados microcontrolado e o software. A Figura 18 mostra um diagrama da organização do sistema, as flechas indicam o sentido de troca de informações entre as diferentes partes. Por exemplo, a relação entre o software e o circuito microcontrolado se dá através do envio e recebimento de dados, já a relação entre o circuito de condicionamento de sinal se dá somente a partir do envio de sinais elétricos para o circuito microcontrolado.

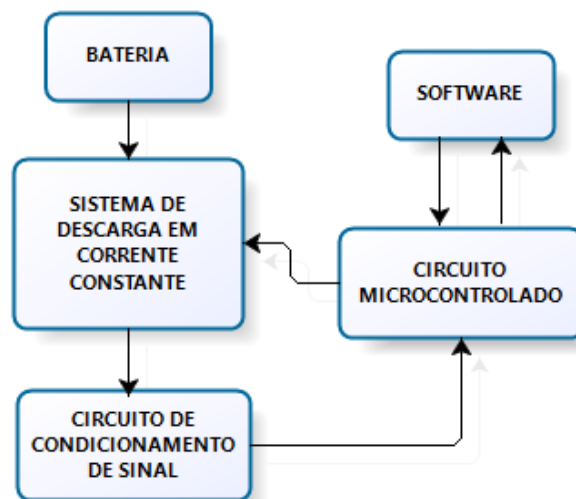


Figura 18. Diagrama geral do sistema.

##### 3.1.1. O sistema de descarga em corrente constante

O sistema de teste desenvolvido neste trabalho utiliza o método de descarga à corrente constante para determinação do estado de carga de baterias de chumbo-ácido. Ele foi escolhido por ser um método que permite a estimativa da quantidade de carga e do estado de carga de maneira simples e rápida. Além disso, no Brasil, ele é preconizado pela ABNT, na forma da NBR 14205, para ensaios em baterias de

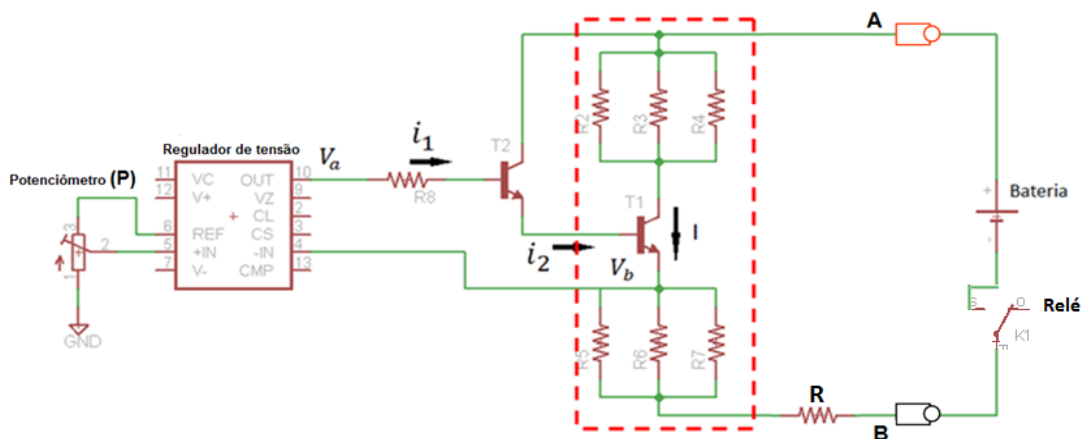


chumbo-ácido, no que tange a determinação da capacidade da bateria e da eficiência de recarga.

### 3.1.1.1. O circuito eletrônico de descarga

Um circuito eletrônico foi desenvolvido para realizar a descarga da bateria à corrente constante, sendo que a intensidade desta corrente pode ser ajustada pelo operador. O circuito simula uma resistência dinâmica, que varia de forma a manter a corrente de descarga constante, apesar do fato de que a tensão da bateria varia em função do tempo durante a descarga.

A resistência dinâmica é composta por seis resistores de  $1\ \Omega$  de 10 W de potência e um transistor. Três desses resistores foram ligados em paralelo e conectados ao coletor do transistor e os outros três, também em paralelo, foram conectados ao emissor do transistor. O transistor é polarizado na zona linear e funciona como uma resistência variável controlada pela intensidade de corrente na base. O circuito que fornece a corrente de base é composto por um circuito integrado regulador de tensão. A Figura 19 mostra o diagrama do circuito.



**Figura 19.** Diagrama do circuito eletrônico de descarga em corrente constante.

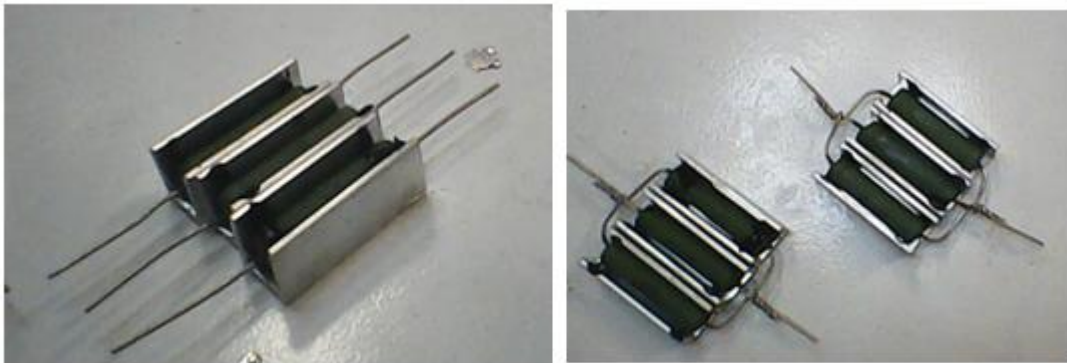
A bateria é ligada aos bornes (A e B) do circuito de descarga. Neste instante, a corrente de descarga  $I$  começa a fluir através dos blocos de resistência e do transistor. À medida que a bateria é descarregada a tensão em seus terminais varia o que, em princípio, isso causaria a variação da corrente de descarga  $I$ . Uma variação na corrente  $I$  significa uma variação da tensão  $V_b$  nos resistores  $R_5$ ,  $R_6$  e

R7. No circuito desenvolvido, o pino 4 do LM 723 percebe a tendência de variação da tensão  $V_b$  e ajusta a corrente  $i_1$ , que polariza o transistor T2. Isso faz com que a corrente  $i_2$ , que polariza T1, varie, alterando assim a resistência interna deste transistor e como consequência a corrente  $I$  e a tensão  $V_b$  são mantidas constantes. O potenciômetro (P) permite o ajuste da corrente de descarga  $I$ , agindo sobre a tensão  $V_a$ .

O resistor R é utilizado como *shunt* para medida indireta da corrente de descarga e o relé é utilizado para controlar o início e o final da descarga da bateria.

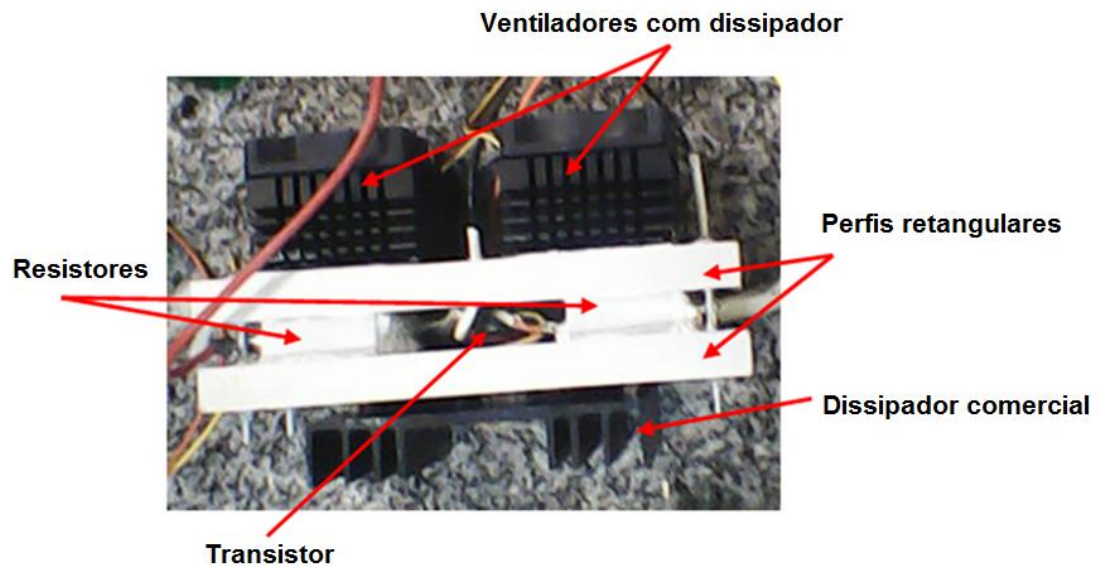
### 3.1.1.2. A estrutura de dissipação

À medida que a corrente flui pelos resistores e pelo transistor, do circuito de corrente constante, estes dispositivos aquecem. Para dissipar o calor gerado uma estrutura de dissipação foi desenvolvida, onde os seis resistores foram fixados à perfis de alumínio em “U” e o conjunto desses resistores, junto com o transistor, foram organizados entre dois perfis retangulares, ambos de alumínio. A Figura 20 mostra os resistores nos perfis.



**Figura 20.** Imagem dos resistores do sistema de descarga em corrente constante nos perfis em “U”.

Na estrutura montada, um dissipador de alumínio comercial foi fixado a um dos perfis retangulares e dois ventiladores de 50X50 mm foram utilizados para melhorar a dissipação. Com objetivo de aumentar a eficiência da dissipação de calor, pasta térmica foi utilizada entre os resistores e os perfis em “U”. A Figura 21 mostra a estrutura final de dissipação de calor.



**Figura 21.** Estrutura de dissipação de calor.

### 3.1.1.3. Testes do sistema de descarga em corrente constante

Após o desenvolvimento do circuito de descarga em regime de corrente constante e do sistema de dissipação de calor, testes foram realizados com objetivo de verificar se a corrente de descarga da bateria se mantinha constante e verificar a temperatura da estrutura de dissipação.

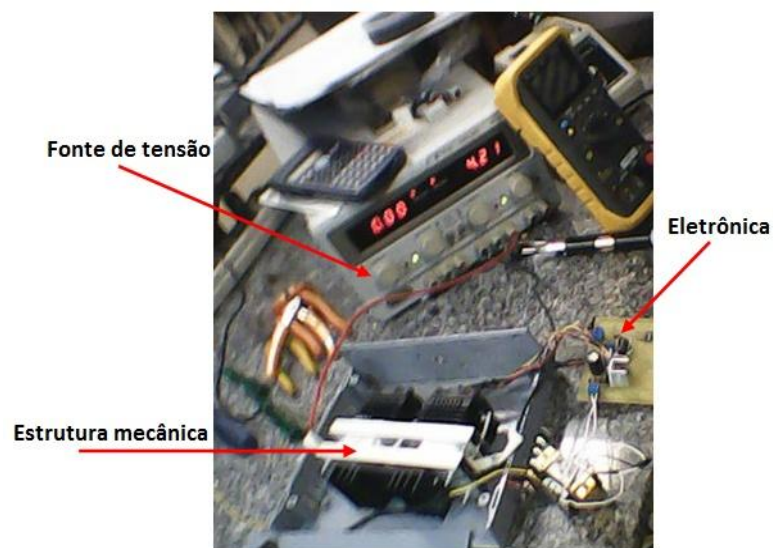
Nos testes foi utilizada uma fonte de tensão da *Minipa*, a tensão desta fonte foi ajustada de modo a simular a variação de tensão da bateria e o valor de corrente foi ajustado em 4,21 A.

O objetivo do primeiro teste foi verificar se a intensidade da corrente mudava com a variação da tensão de entrada. A tensão da fonte foi variada em passos de 1 V e observou-se que para valores entre 8 e 17 V a corrente se manteve constante. O resultado foi satisfatório uma vez que as baterias de chumbo-ácido de 12 Volts nominal, que são o foco do trabalho, quando submetidas à descarga geralmente mantêm sua tensão entre 10 e 14 Volts.

O segundo teste teve por objetivo analisar se para um determinado valor de tensão, a corrente se mantinha constante no tempo. A corrente foi então ajustada em 5.39 Ampere e a tensão em 11.82 Volts. Assim, foram tomados e anotados os valores de corrente, a cada 30 minutos, durante 2 horas. A Tabela 2 mostra os valores medidos e a Figura 22 mostra uma imagem do arranjo experimental.

**Tabela 2.** Variação de corrente em função do tempo do sistema de descarga em corrente constante.

Hora	Tensão (Volts)	Corrente (Amperes)
13:15	11.82	5.39
13:45	11.83	5.38
14:15	11.82	5.39
14:45	11.82	5.38
15:15	11.82	5.38



**Figura 22.** Imagem da montagem para realização dos testes do sistema de descarga em corrente constante.

Um último teste foi realizado para verificar a faixa de ajuste das correntes de descarga permitidas pelo circuito desenvolvido. Assim, foi ajustado o valor de tensão da fonte em 14.5 Volts e progressivamente variados os valores de corrente de descarga entre 1.8 e 6 Amperes. Nesta faixa o funcionamento do circuito é estável e repetitivo.

A determinação do estado de carga de uma bateria pelo método da corrente constante supõe que o dispositivo ensaiado forneça 100% de sua capacidade durante o teste. Para tanto, geralmente, o regime escolhido é de descarga prolongada, às vezes chamada descarga lenta, com duração de 20 horas. Neste regime a intensidade da corrente de descarga deve ser de 5% da capacidade da

bateria (0.05C). Desta forma, para uma bateria hipotética, com capacidade de 100 Ah, a corrente de descarga recomendada é de 5 A.

Como dito anteriormente a faixa de trabalho do circuito de descarga à corrente constante se estende de 1.8 a 6 A, sendo assim, o sistema desenvolvido permite a realização de testes do estado de carga em baterias com capacidade entre 36 e 120 Ah. A Tabela 3 mostra exemplos de capacidade de baterias comerciais, comuns no mercado brasileiro, e seus respectivos valores de corrente de descarga.

**Tabela 3.** Capacidades das baterias em relação aos valores de corrente de descarga.

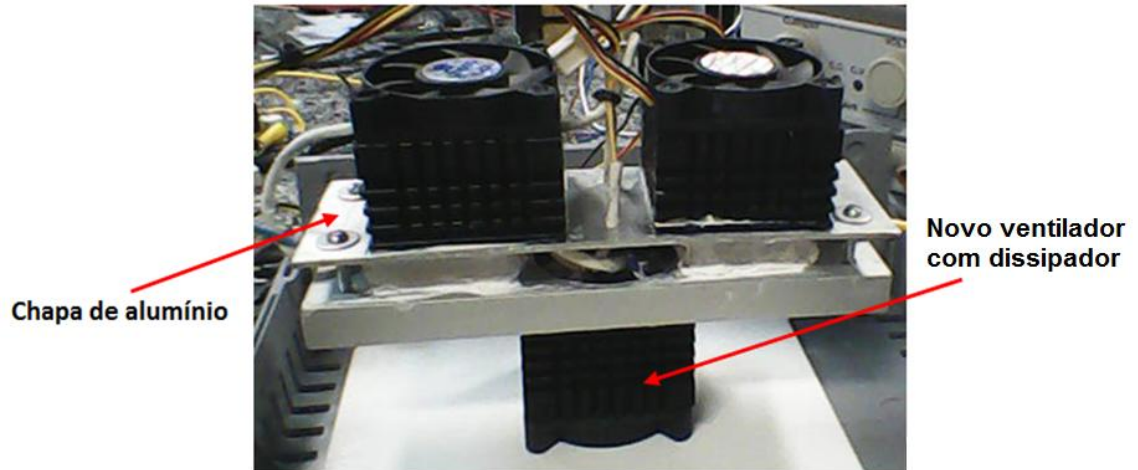
<b>Capacidade (Ah)</b>	<b>Intensidades de corrente de descarga em regime de 20 horas/0.05 C (Ampere)</b>
36	1.8
45	2.25
70	3.5
75	3.75
105	5.25

Durante os testes do circuito de descarga à corrente constante, a temperatura da estrutura de dissipação foi medida com um termopar, o valor verificado foi 90 °C. Esse valor de temperatura foi considerado elevado, levando em consideração que a temperatura do laboratório era de 23 °C e o sistema de dissipação não estava confinado.

Apesar do sistema ter se mantido estável durante os testes, mesmo à 90 °C, foi tomada a decisão de modificar a estrutura de dissipação de calor. Já que se pretendia instalar o sistema de dissipação na mesma caixa que o circuito de aquisição de dados de descarga à corrente constante.

Na estrutura de dissipação, um dos perfis retangulares foi substituído por uma chapa de alumínio, isso permitiu o contato direto entre os ventiladores e a carga resistiva, o que não acontecia antes. O dissipador comercial foi substituído por um

ventilador do mesmo modelo que os outros. A Figura 23 mostra a foto da nova montagem.



**Figura 23.** Novo sistema de dissipação de calor.

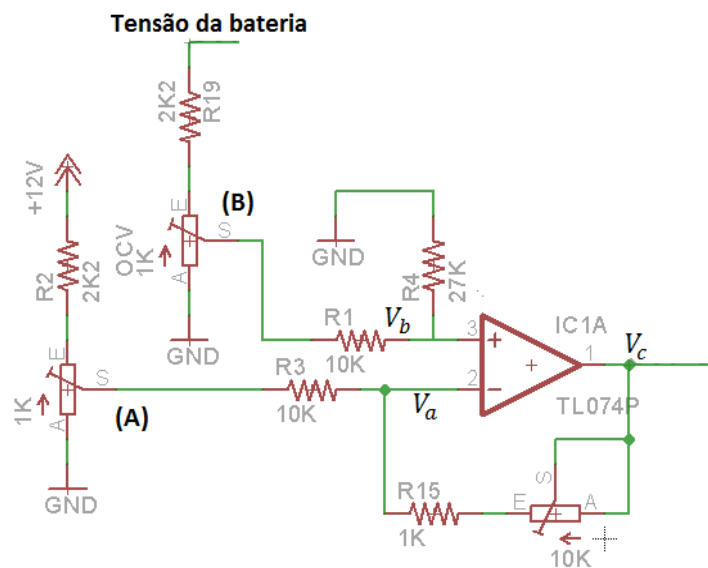
Utilizando o mesmo termopar, a temperatura da nova estrutura foi medida, para o mesmo valor de corrente de descarga. A temperatura registrada foi 50°C, ou seja, a nova estrutura permitiu uma importante melhora na dissipação, em relação à medida anterior (90 °C).

### 3.1.2. Circuito de condicionamento de sinal

Antes que os sinais elétricos de interesse pudessem ser digitalizados pelo circuito microcontrolado, um circuito de condicionamento de sinal teve que ser intercalado. Isto em função do fato de que os sinais de tensão e corrente da bateria não estavam dentro da faixa de trabalho do conversor analógico-digital do microcontrolador utilizado nesse trabalho, ou seja, entre 0 e 5 Volts. Os valores de tensão das baterias geralmente variam entre 10.5 e 17 Volts, para regimes de carga, descarga e recuperação. Os valores de corrente são obtidos indiretamente através de medidas de tensão no resistor de *shunt* do circuito de descarga em corrente constante, para baterias comerciais, esses valores variam entre 0.18 e 0.6 Volts.

Três amplificadores operacionais TL 071 foram utilizados para ajustar os sinais de tensão e corrente da bateria para a faixa de 0 a 5 Volts, um amplificador para tensão de circuito aberto, outro para tensão em descarga e o último para corrente de descarga.

Para as medidas de tensão de circuito aberto e tensão em descarga, os amplificadores foram utilizados na configuração diferencial com ganho de 2.5, como mostra a Figura 24. Na entrada inversora foi ajustado  $V_a$ , utilizando um divisor resistivo com potenciômetro (A), fixado em 2.5 Volts. Na entrada não-inversora há outro divisor resistivo feito pelo potenciômetro (B), que divide a tensão da bateria para  $\frac{1}{4}$  de seu valor nominal e assim gera  $V_b$ . A saída  $V_c$ , do amplificador, será a subtração de  $V_a$  e  $V_b$ , multiplicada pelo ganho deste estágio. A Tabela 4 mostra os valores antes e depois do circuito de condicionamento.



**Figura 24.** Diagrama do circuito de condicionamento da tensão de circuito aberto e tensão de descarga.

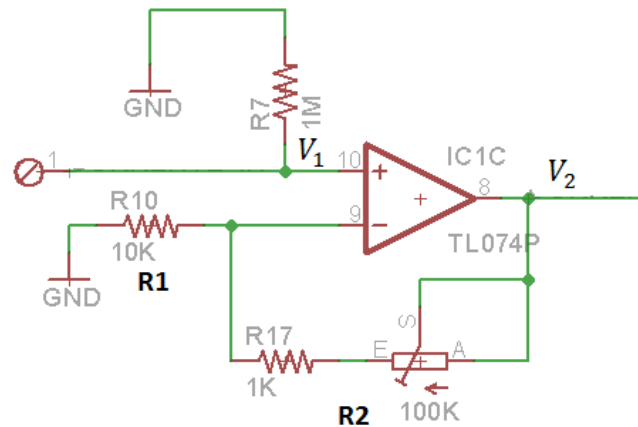
**Tabela 4.** Faixa de valores de tensão antes e depois do condicionamento de sinal.

	Valores da bateria (Volts)	Valores após condicionamento (Volts)
Tensão em circuito aberto	11 a 18	0.625 a 5
Tensão em descarga	10.5 a 13.5	0.31 a 2.19

Para as medidas de corrente, o amplificador operacional foi utilizado na configuração não-inversora, a figura 25 mostra o diagrama do circuito. Nessa configuração  $V_2$  é igual a  $V_1$  multiplicado pelo ganho. Por sua vez, o valor do ganho é obtido a partir da relação  $(1 + R2/R1)$ .  $R1$  é um resistor de 10 K e  $R2$  é composto por



um resistor de 1K em série com um potenciômetro de 100K, o ganho escolhido para este estágio foi 9. A Tabela 5 mostra os valores de saída  $V_2$  a partir dos valores de entrada  $V_1$ .  $V_1$  corresponde a queda de tensões no resistor de shunt.



**Figura 25.** Circuito de condicionamento.

**Tabela 5.** Faixa de valores antes e depois do condicionamento de sinal.

	Faixa de valores de tensão $V_1$ (Volts)	Faixa de valores após condicionamento $V_2$ (Volts)
Tensão no resistor de <i>shunt</i>	0.18 a 0.6	1.44 a 4.8

Uma vez condicionados, os sinais de tensão e corrente já podem ser digitalizados, isto é, convertidos de analógico para digital. Para que assim eles possam ser lidos e armazenados pelo sistema de aquisição de dados micro-processado, e em seguida enviados a um computador, por exemplo.

Os circuitos de condicionamento de sinais foram montados em uma placa de circuito impresso, a Figura 26 mostra uma foto da placa.



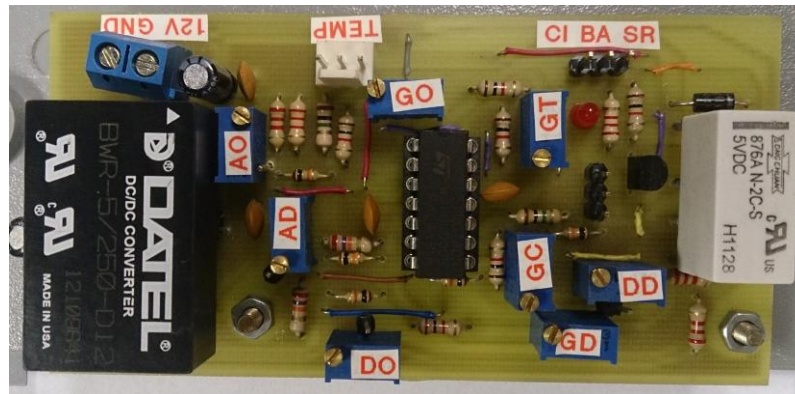


Figura 26. Placa do circuito de condicionamento.

### 3.1.3. Circuito microcontrolado

O circuito microcontrolado foi projetado para enviar comandos ao sistema de descarga em corrente constante, receber sinais do circuito de condicionamento de sinal, implementar o protocolo de comunicação, permitir comunicação por padrão RS-232 e enviar dados para um computador pessoal (PC).

Nesse circuito foi utilizado um microcontrolador do fabricante Microchip® modelo 16F877A, ele possui um conversor analógico-digital (ADC) com resolução de 10 bits, dotado de um multiplex analógico, de forma que a entrada do ADC pode ser comutada, permitindo até 8 entradas analógicas. Nesse trabalho serão utilizadas duas portas, uma para tensão e uma para corrente. O microcontrolador ainda possui comunicação serial padrão TTL e portas de saída digitais para interface com circuitos externos. A figura 25 mostra o diagrama do circuito microcontrolado.

Para identificação de cada unidade de descarga foi utilizado um *dipswitch* (B) de 8 posições, ou seja, 8 bits sendo assim os valores de identificação podem variar entre 0 e 255. Essa identificação é utilizada durante a comunicação com o *software* residente no PC.

Para iniciar a descarga da bateria, o microcontrolador envia um sinal de 5 Volts a partir da porta RD1 na base do transistor (A), que aciona a bobina do relê do circuito de descarga em corrente constante. A partir daí os valores de tensão e corrente, preparados pela placa de condicionamento de sinal, são convertidos. No caso de leitura de tensão em circuito aberto, o relê de descarga não é acionado.

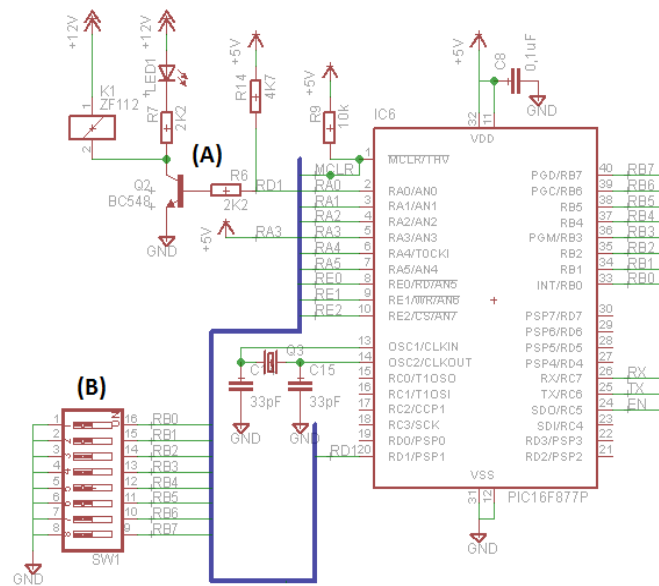


Figura 27. Diagrama do circuito microcontrolado.

### 3.1.3.1. Circuito de comunicação serial

Para a comunicação entre o circuito microcontrolado e um computador é necessário um padrão de comunicação, assim o padrão serial RS-232 foi escolhido, ele é bastante utilizado em computadores pessoais e de simples implementação.

O microcontrolador fornece apenas sinais em padrão TTL, dessa forma se faz necessário um circuito que realize a conversão de TTL para RS-232 e vice-versa. Para isso um circuito integrado MAX232 foi utilizado. A Figura 28 mostra o circuito de comunicação serial.

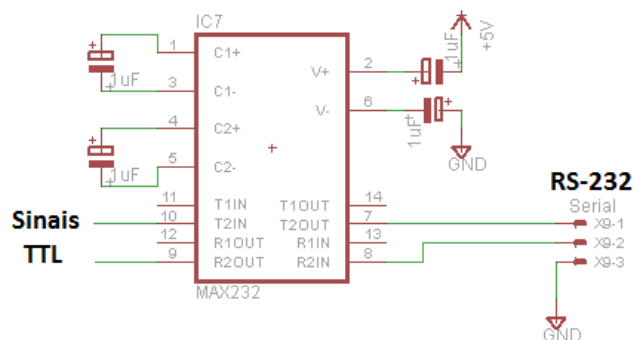


Figura 28. Diagrama do circuito para comunicação.

A taxa de transmissão utilizada nesse trabalho foi sempre de 9600 bits por segundo, um bit de parada igual a 1, sem bit de paridade e 8 bits de dados.

### 3.1.4. Firmware

Para execução de suas funções o microcontrolador necessita de instruções em linguagem de máquina, chamado código *assembly*. É através desse código, salvo em sua memória de programa permanente, que ele pode executar a conversão A/D, a comunicação serial e o recebimento e envio de comandos. Esse código básico para execução das funções e do sistema de teste de bateria desenvolvido nesse trabalho é chamado de *firmware*.

Para tanto, os códigos foram desenvolvidos em linguagem C através da interface de desenvolvimento *CCS Compiler*, que converte o código de linguagem C para *assembly* do microcontrolador usado. A Figura 29 mostra um fluxograma de funcionamento do *firmware*.

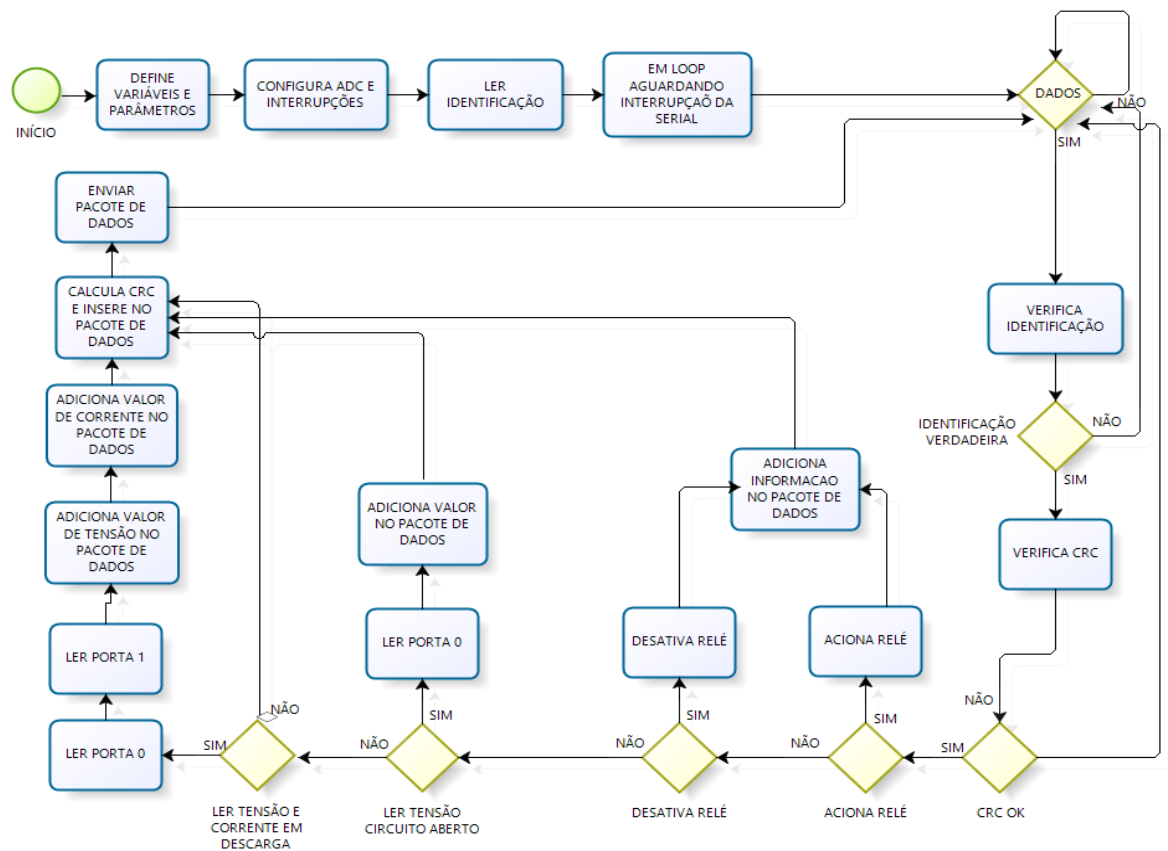


Figura 29. Fluxograma do firmware

O funcionamento do *firmware* se dá a partir da espera de um pacote de dados contendo os comandos a serem executados. Este comando pode ser o acionamento do rele de descarga, o desligamento do rele de descarga, a leitura de tensão em circuito aberto ou a leitura da tensão e da corrente em descarga. O código completo pode ser visto no Apêndice 1.

Uma vez que um dado pacote chega ao microcontrolador, primeiramente ocorre a verificação do número de identificação e verificação do valor do CRC, ou seja, checar se o pacote de dados não possui erros. Depois é verificado o tipo de comando para que seja realizada a operação. Os dados resultantes da execução do comando são inseridos no pacote de dados juntamente com o cálculo de CRC e finalmente o pacote de dados de resposta é enviado ao PC, através da serial.

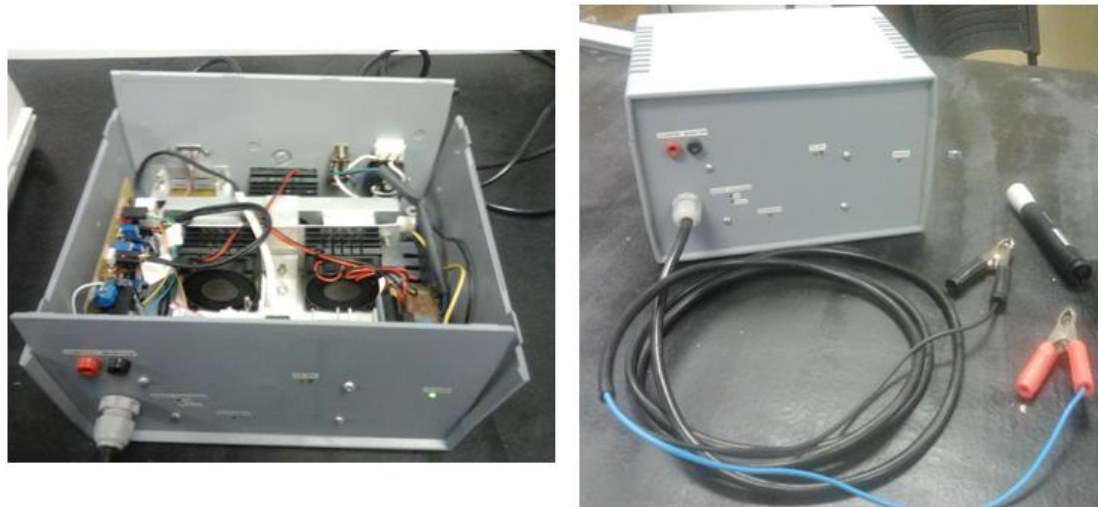
### 3.1.5. Montagem do sistema

Uma parte do circuito eletrônico de descarga, o circuito microcontrolado e o circuito de comunicação foram montados em uma única placa de circuito impresso, a placa principal. A Figura 30 mostra uma foto desta placa.



**Figura 30.** Placa de circuito impresso principal

Por questões de proteção, transporte e segurança, a placa principal, a placa do circuito de condicionamento de sinal e a estrutura de dissipação foram acomodadas em uma caixa de montagem. A Figura 31 mostra uma foto da montagem final.



**Figura 31.** Caixa de montagem para acomodação dos circuitos e estrutura de dissipação.

Na caixa do sistema foi instalado um prensa cabo, com um cabo do tipo PP de 2 vias de  $1\text{mm}^2$  de diâmetro para conexão do sistema de teste com a bateria. Em uma das extremidades do cabo foi colocada em cada via um terminal do tipo garra para facilitar a conexão na bateria, sendo uma para o terminal positivo e outra para o negativo. A partir de agora o conjunto de circuitos e funções residentes nessa caixa será chamado de: equipamento.

### 3.1.6. Protocolo de comunicação

O protocolo de comunicação foi desenvolvido baseado no protocolo *Modbus*, muito utilizado na indústria, além de ser bem documentado e de livre implementação. Ele possui detecção de erros a partir de CRC ou checagem de redundância cíclica (MODBUS, 2012). Ele também foi utilizado devido ao fato de ser bastante utilizado em conjunto com o padrão de comunicação RS-485, esse padrão foi utilizado nos sistemas desenvolvidos para o Observatório Pierre Auger.

Os pacotes de dados nesse trabalho são estruturados em conjuntos de bytes, os comandos de solicitação, por exemplo, são sempre composto por 8 partes de 1 byte cada, enquanto que os de resposta são de 30 partes de 1 byte. Os pacotes de solicitação são divididos em identificação, função, registrador, dados e CRC. Enquanto que os pacotes de resposta são constituídos de identificação, dados e CRC.

Os comandos enviados como solicitação são: acionar relé de descarga, desativar relé de descarga, ler valores de tensão em circuito aberto e ler valores de tensão e corrente de descarga. As respostas são o estado do relé de descarga e os valores de tensão e corrente solicitados. A Figura 32 mostra a estrutura dos pacotes de dados de solicitação e de resposta.

Solicitação							
Identificação	Função	Registrador		Dados		CRC	
0	1	2	3	4	5	6	7
ID	FUNC	REG_H	REG_L	DATA_H	DATA_L	CRC_L	CRC_H
X	x	x	x	x	x	x	x
1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte

Resposta			
Identificação	Dados	CRC	
0	1 - 27	28	29
ID	DATA	CRC_L	CRC_H
x	x	x	x
1 byte	27 bytes	1 byte	1 byte

**Figura 32.** Estrutura do pacote de dados do protocolo de comunicação.

O primeiro byte (ID) é de identificação do equipamento, ele está presente nos dois tipos de pacotes. A Tabela 6 mostra em detalhes a descrição de cada byte dos pacotes de dados.

**Tabela 6.** Descrição dos componentes dos pacotes de dados.

	Descrição
Identificação (ID)	Identificação do equipamento, número de 0 a 255.
Função (FUNC)	Tipo de comando solicitado ao microcontrolador.
Registrador (REG_H e REG_L)	Especificação do comando escolhido em FUNC.
Dados (DATA_H e DATA_L)	Informações adicionais e dados lidos pelo microcontrolador.
CRC (CRC_H e CRC_L)	Valor de checagem de redundância cíclica.

Parâmetros como o conteúdo do registrador, os dados e o CRC são palavras de 16 bits, mas, como a estrutura de comunicação é configurada para o envio de um byte por vez, estas palavras foram divididos em dois bytes, uma parte com os 8 bits mais significativos e a outra com os 8 bits menos significativos. Por exemplo, quando o conteúdo do registrador é dividido em dois, a parte composta pelos 8 bits mais significativos é transmitida sob o nome de REG\_H, enquanto a outra, composta pelos 8 bits menos significativos, é veiculada sob a designação REG\_L.

### 3.1.7. Software

Para o funcionamento do sistema é necessário um software dedicado, rodando num PC. Ele é responsável por estabelecer comunicação com o circuito microcontrolado, enviar e receber dados, implementar o protocolo de comunicação, permitir a calibração do ADC, salvar os parâmetros de calibração do ADC, salvar os dados recebidos em arquivos de texto e permitir interação com o usuário. O software foi desenvolvido em linguagem C# da Microsoft®.

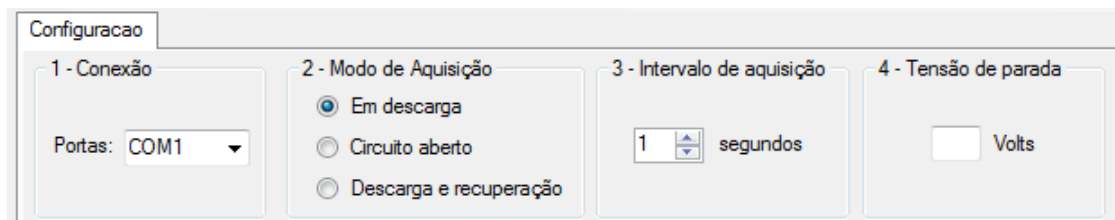
Através do software é possível visualizar as portas seriais disponíveis no computador e conectar-se a uma delas. Existem três modos de aquisição de dados, são eles:

- **Em descarga** – o relé de descarga é acionado e a bateria começa a ser descarregada. Os valores de tensão e corrente são adquiridos durante a descarga e a aquisição termina quando a tensão atinge o valor de tensão de parada.
- **Em circuito aberto** - o relé de descarga não é acionado, por sua vez a bateria não é descarregada e os valores de tensão em circuito aberto da bateria são adquiridos
- **Descarga e recuperação** – nesse modo, inicialmente a aquisição é feita em descarga até que a tensão de parada seja atingida. A partir daí a aquisição muda automaticamente para o modo em circuito aberto.

No modo descarga e descarga e recuperação é utilizado o parâmetro tensão de parada. Existe um campo no software onde ele pode ser inserido. Este valor é utilizado para finalizar a aquisição de dados no modo em descarga, onde o comando

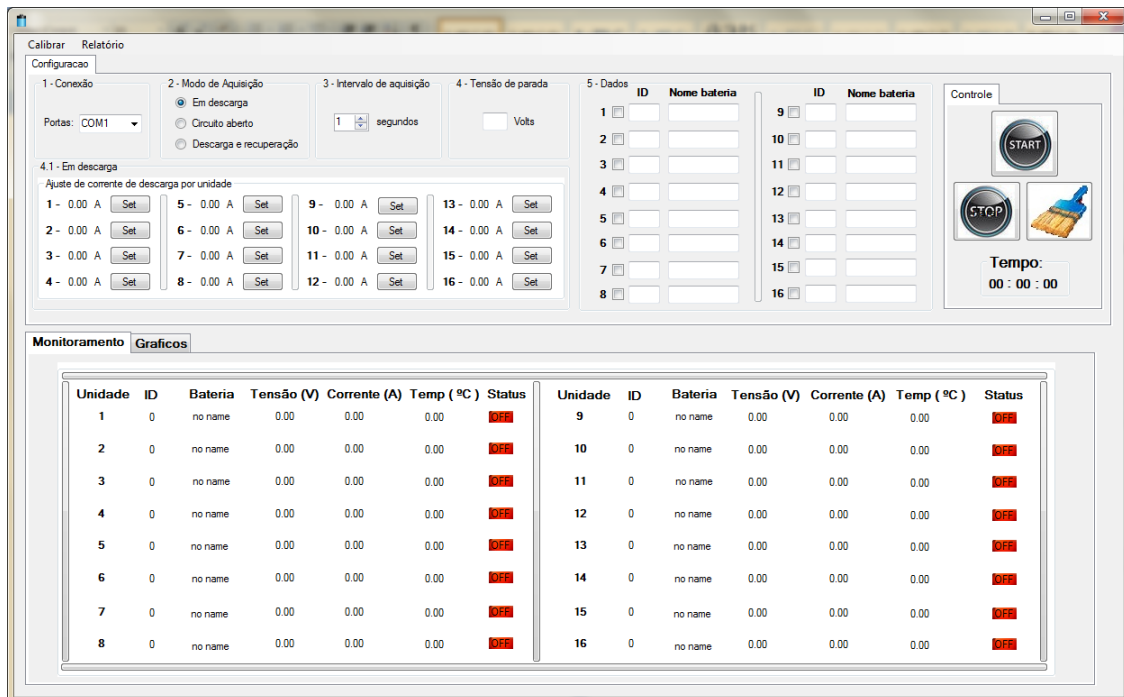


de desligamento do rele é enviado e o sistema é desligado. O software também permite escolher o intervalo de tempo de aquisição de dados, ou seja, o tempo entre uma leitura e a próxima, sendo que ele varia entre 1 e 60 segundos. A Figura 33 mostra uma imagem com parte do software referente, a escolha da porta serial para comunicação, os modos de aquisição, o intervalo de aquisição e o valor de tensão de parada.



**Figura 33.** Imagem da aba de configuração do software.

O software ainda permite salvar os parâmetros da curva de calibração, visualizar o valor de corrente de descarga, quando ajustada via potenciômetro, e nomear a bateria a ser testada. A Figura 34 mostra uma imagem completa da interface do software.

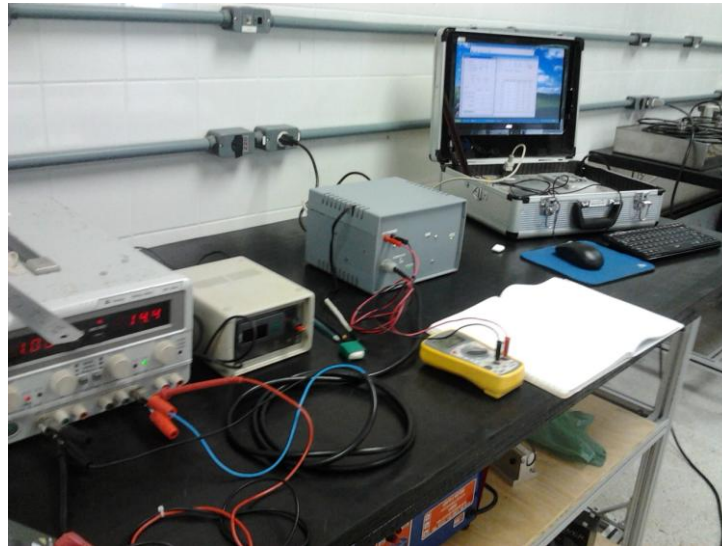


**Figura 34.** Imagem da interface principal do software.



### 3.1.8. Calibração do sistema

Antes da realização de aquisição de dados, o sistema teve que ser calibrado. Este procedimento foi feito utilizando uma fonte de tensão variável de laboratório, um multímetro e um computador pessoal. Primeiro foi calibrado a tensão em circuito aberto, depois a tensão em descarga e por último a corrente em descarga. A Figura 35 mostra uma foto da montagem feita para a calibração, nela pode ser vista o equipamento, a fonte de tensão, o multímetro e o computador.



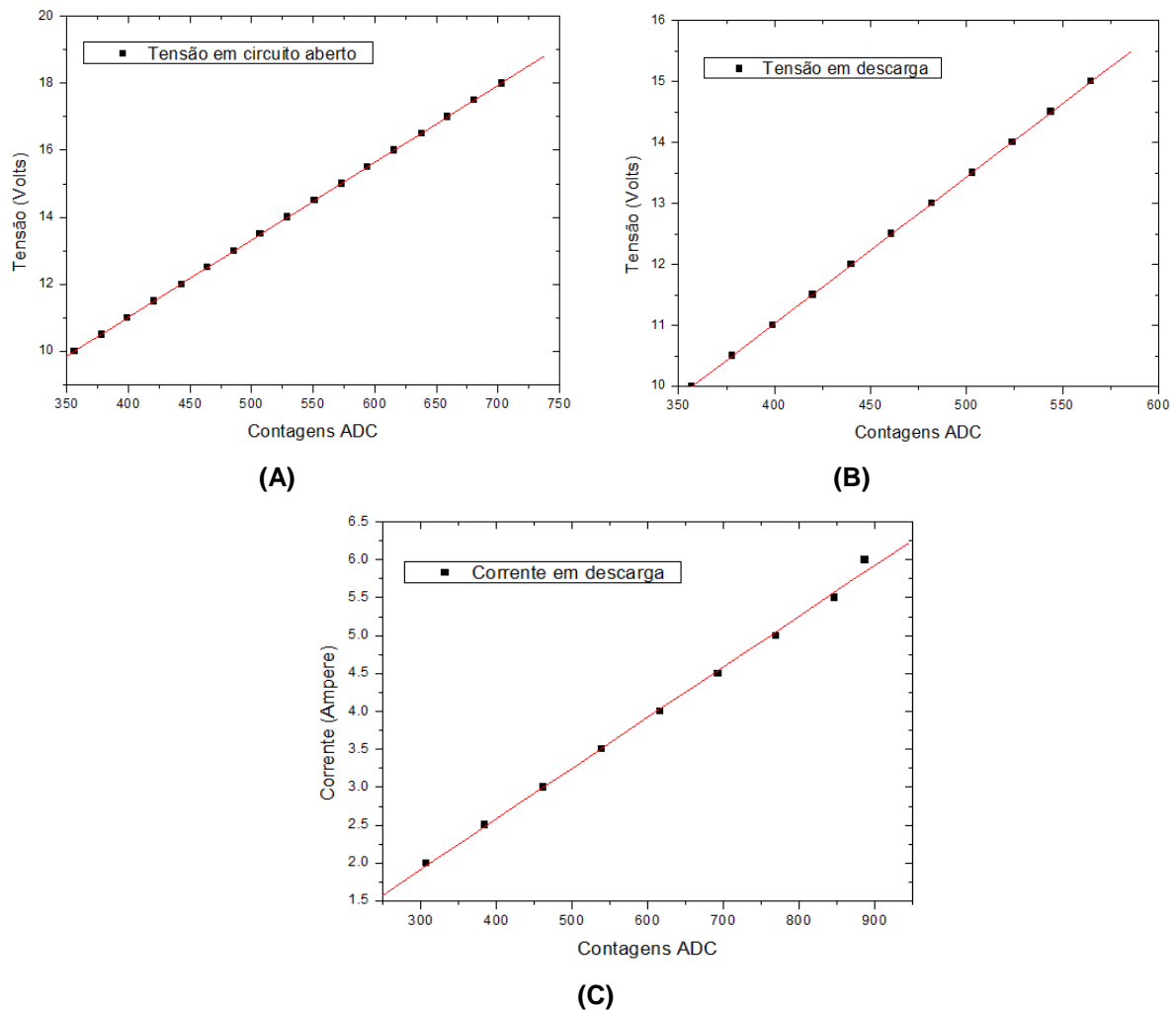
**Figura 35.** Imagem da montagem utilizada para calibração do sistema.

Para a calibração do ADC para a medida de tensão em circuito aberto, a fonte de tensão variável foi ligada ao equipamento de teste de baterias e a tensão variada de 0 a 18 volts, em passos de 0.5 volts. Para cada valor ajustado na fonte foi anotado o número de contagens do ADC, para isso foi utilizado a tela de calibração do software. O mesmo procedimento foi adotado para a calibração da medição da tensão em descarga, com a diferença deste procedimento se dar para valores de tensão entre 0 e 14.5 volts.

Na calibração da corrente, o potenciômetro do sistema de descarga em corrente constante foi ajustado variando a intensidade corrente de 1.8 a 6 Amperes, em passos de 0.5 Amper e as contagens do ADC foram anotadas.

Em todos os procedimentos, os valores de tensão e corrente foram medidos com um multímetro nos terminais da fonte de tensão ajustável de bancada.

Uma vez com os valores de tensão, corrente e suas respectivas contagens de ADC foram montados os gráficos da grandeza em função das contagem de ADC. O intuito foi obter os parâmetros da curva de calibração para que se pudesse salvar em um arquivo de configuração através da tela de calibração do software. É a partir desses parâmetros que o software realiza a conversão dos valores de contagens do ADC, vindos do sistema microcontrolado, em valores de tensão e corrente. A Figura 36 mostra os gráficos de calibração do ADC para tensão de circuito aberto e tensão e corrente em descarga, em vermelho podem ser vistas retas utilizadas para ajuste dos pontos.



**Figura 36.** Curvas de calibração do ADC para tensão em circuito aberto (A), tensão em descarga (B) e corrente em descarga (C).

As curvas de calibração podem ser expressas por funções de primeiro grau, a Tabela 7 mostra as funções das curvas e os parâmetros que foram salvos no

arquivo de configuração a partir do software, sendo o coeficiente angular da função chamado de *coeficient* e o termo independente de *offset*. A Figura 37 mostra uma imagem da tela do *software* utilizada para, visualizar as contagens do ADC durante a calibração, e os campos de inserção dos parâmetros de calibração.

**Tabela 7.** Funções das curvas e parâmetros de calibração.

	Função	Coeficient	Offset
Tensão em circuito aberto	$y = 0.023(\pm 0.009)x + 1.78838 (\pm 2E - 5)$	0.023	1.78838
Tensão em descarga	$y = 0.02(\pm 0.02)x + 1.40924(\pm 3E - 5)$	0.02	1.40924
Corrente em descarga	$y = 0.01(\pm 0.08)x - 0.0862(\pm 1.3E - 4)$	0.01	-0.08626

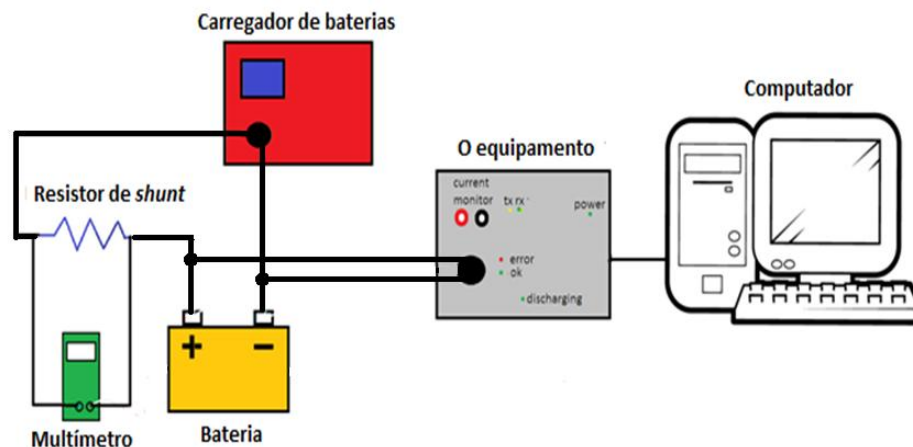


**Figura 37.** Imagem da tela de calibração do software.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes foram realizados com intuito de validar o equipamento desenvolvido como um todo, ou seja, o circuito microcontrolado, o circuito de condicionamento de sinal, a comunicação e o sistema de descarga em corrente constante. Nos testes foram utilizadas duas baterias de 45 Ah de capacidade, uma nova (recém comprada no comercio local e nunca usada) e uma velha (bateria retirada de uso em veiculo automotor após dois anos e meio de serviço), ambas de mesmo fabricante. Além do sistema de aquisição de dados, um resistor de *shunt*, um multímetro e um carregador comercial de baterias automobilísticas foram empregados na campanha de testes de validação. A precisão do multímetro é de 0,025 % e os testes foram realizados em laboratório a 24°C de temperatura.

Inicialmente as baterias foram carregadas até alcançar a tensão de parada e os valores de corrente de carga foram monitorados a partir de um resistor de *shunt*. Depois da carga as baterias foram deixadas em recuperação (pós-carga) e em seguida descarregadas, por fim elas foram deixadas em recuperação (pós-descarga). A figura 38 mostra um digrama da montagem dos testes.



**Figura 38.** Diagrama da montagem dos testes para validação do sistema.

Fonte: (DEMETINO, 2013)

A partir dos dados de tensão e corrente, adquiridos pelo sistema de aquisição de dados, foram montadas as curvas de carga, de recuperação pós-carga, de descarga e de recuperação pós-descarga, além de determinado o real estado de carga das baterias no momento em que a bateria de teste foi iniciada.

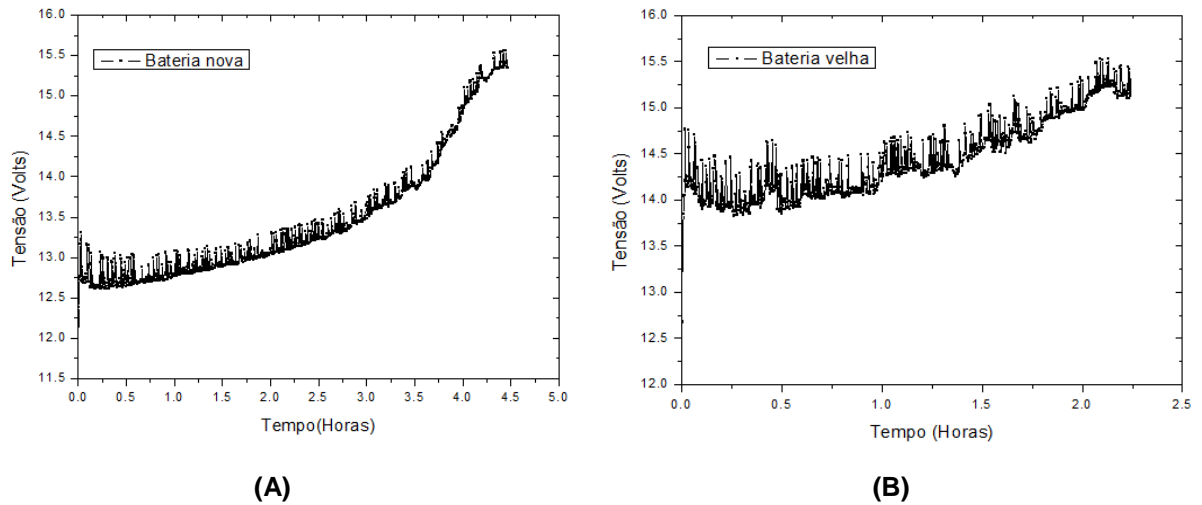
Como mencionado anteriormente, um sistema de caracterização de baterias, muito similar ao sistema reportado nesta dissertação, foi desenvolvido para testar as baterias do Observatório Pierre Auger. Assim, os ensaio de validação da bancada de teste do OPA podem ser vistos no Anexo 1 deste trabalho, no artigo publicado no *Renewable Energy and Power Quality Journal*.

#### 4.1. CARGA

As baterias foram carregadas utilizando um carregador comercial de fabricação *Okei®* para baterias automobilísticas de 12 volts. Este equipamento possui capacidade de fornecimento de até 30 Ampere de corrente, podendo ser ajustada. Tentou-se, através da página web do fabricante, encontrar informações sobre o método de carga recomendado para este modelo de bateria, porém nada a respeito foi encontrado. Testes realizados com o carregador mostraram que os valores de tensão e corrente flutuam em função da dinâmica da bateria e o mesmo não segue nenhum dos métodos conhecidos na literatura. Apesar disso, quando ajustado um valor de corrente, este tende a oscilar próximo ao valor ajustado.

Nesse trabalho o carregador foi ajustado para fornecer 4.5 Ampere, este valor foi escolhido seguindo a literatura que recomenda o valor de 10% da capacidade da bateria. Como dito anteriormente as baterias são de 45 Ah, por isso esse valor de 4.5 A. Essa forma de ajustar a intensidade de corrente é feita quando o método de carga é o de carga em corrente constante.

Mesmo que o carregador não utilize o método de carga em corrente constante, o valor foi mantido como referencia e a cada meia hora os valores de corrente foram anotados. Ao se fazer uma carga de teste com as baterias se percebeu que ao atingir aproximadamente 15 volts o valor de corrente diminui, sendo assim, este limite foi considerado como sendo a tensão de sobrecarga e gaseificação. Por questões de preservação da bateria esse valor de 15 V foi adotado como sendo a tensão final de carga. Spiers (1995) e Koutroulis (2004) recomendam do valor de 14.4 V como sendo o valor de tensão final de carga. Entretanto, este valor varia de acordo com o estado de carga, regime de carga e tipo da bateria. A carga da bateria foi realizada com o sistema ajustado em modo de aquisição de circuito aberto. A Figura 39 mostra as curvas de carga da bateria nova e da bateria velha, obtidas a partir dos valores adquiridos.

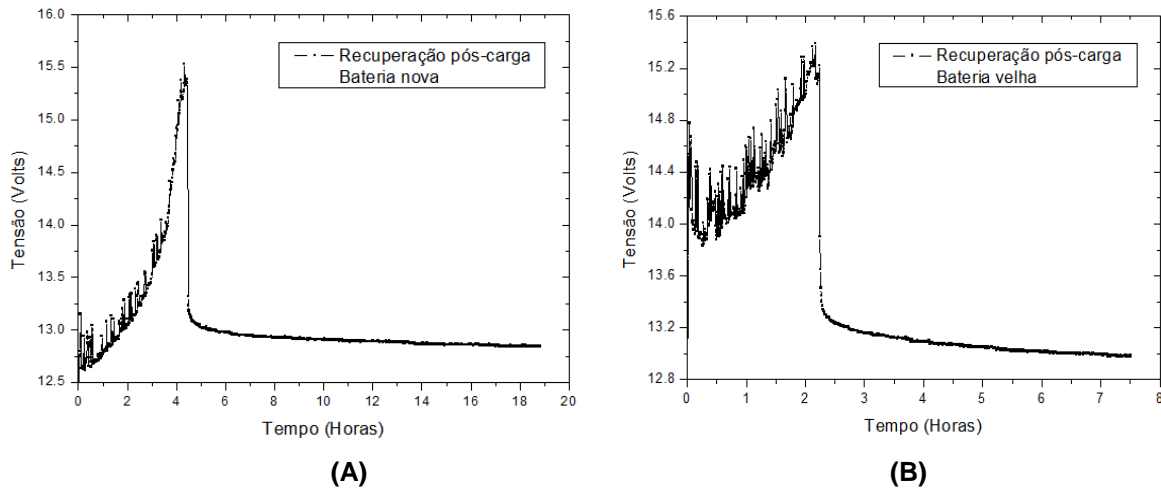


**Figura 39.** Curvas de carga da bateria nova (A) e da bateria velha (B).

A bateria nova levou 4.47 horas para ser carregada, enquanto que a velha levou somente 2.24 horas. As curvas são similares as curvas de carga obtidas quando as baterias são carregadas pelo método de carga em corrente constante, como mostrado na Figura 6.

## 4.2. RECUPERAÇÃO PÓS-CARGA

Após a carga das baterias, o carregador foi desconectado das baterias e então, a partir daquele momento, a bateria passou a estar em regime de recuperação. O sistema de aquisição de dados não foi desligado e a aquisição em modo circuito aberto foi continuada. A Figura 40 mostra as curvas de recuperação pós-carga das baterias nova e velha obtidas através dos dados adquiridos.



**Figura 40.** Curvas de recuperação pós-carga da bateria nova (A) e da bateria velha (B).

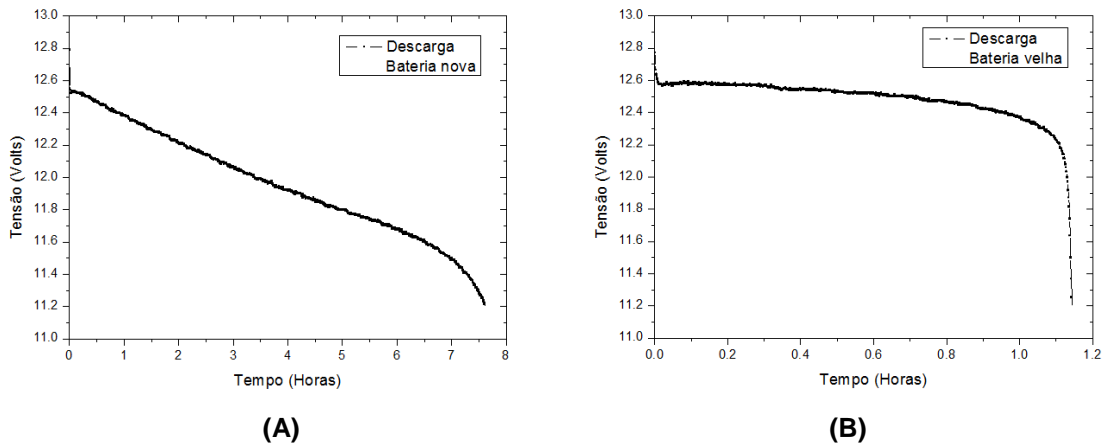
As curvas adquiridas são exponenciais, onde inicialmente se percebe uma queda brusca da tensão seguida de uma queda de tensão mais suave. Não houve diferença entre a forma da curva das duas baterias e elas estão condizentes com as curvas mostradas na literatura, por exemplo, em Ng (2008).

Como evidenciado na revisão da literatura de referência deste trabalho, o tempo de recuperação foi objetivo de estudos em alguns autores. Dessa forma, utilizando o sistema descrito neste trabalho, foram feitos estudos da influência do tempo de recuperação na quantidade de carga de baterias de chumbo-ácido automotivas. O experimento, bem como as discussões e resultados, podem ser vistos no anexo 2 deste trabalho, que traz uma cópia do artigo publicado no *XI Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica (CIBIM)*.

### 4.3. DESCARGA EM CORRENTE CONSTANTE

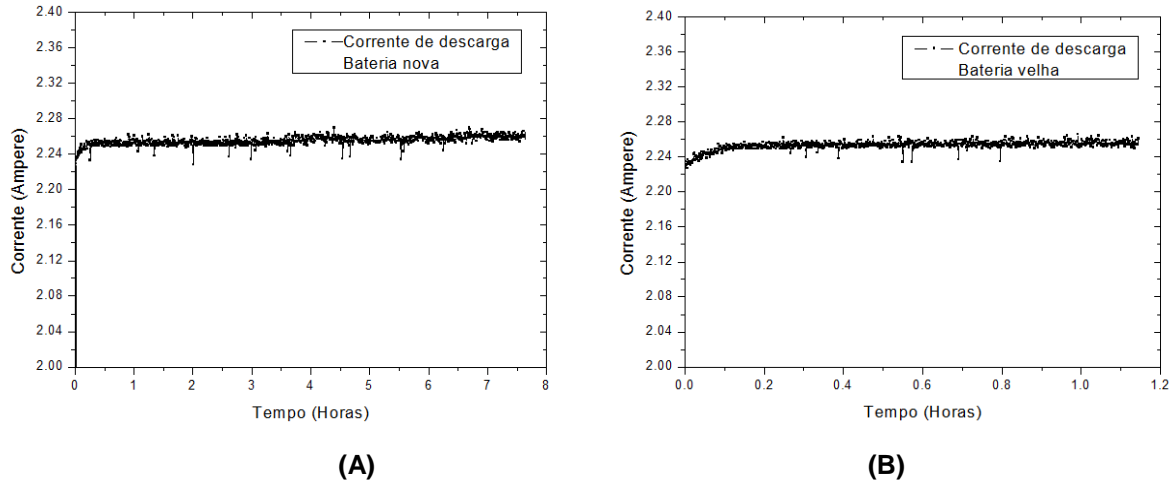
Após a recuperação das baterias pós carga, estas foram submetidas um ciclo de descarga. O valor de corrente de descarga escolhido foi de 2.25 Ampere, esse valor foi escolhido por ser referente a uma descarga lenta, ou seja, uma taxa de descarga de 0.05C. Segundo o fabricante, 100% do estado de carga pode ser obtido a partir dessa taxa de descarga, para descarga em corrente constante. Além disso, ao se descarregar uma bateria em descarga lenta, tem-se maior aproveitamento da capacidade (ENERGY, 1998).

A figura 41 mostra as curvas de descarga das baterias, obtidas a partir dos valores de tensão em descarga.



**Figura 41.** Curvas de descarga da bateria nova (A) e da bateria velha (B).

A descarga da bateria nova durou 7.61 horas, enquanto que a bateria velha levou 1.14 horas. A partir dos dados obtidos durante a descarga as curvas de corrente também puderam ser plotadas, a Figura 42 mostra as curvas de corrente de descarga da bateria nova e velha.



**Figura 42.** Curvas de corrente de descarga da bateria nova (A) e da bateria velha (B).

A corrente média de descarga da bateria nova foi de  $2.255 \pm 0.009$  A, enquanto a bateria velha forneceu  $2.254 \pm 0.005$  A.

Uma vez com os valores de corrente de descarga e os tempos de descarga, os valores de estado de carga foram obtidos a partir da equação (6) utilizando as quantidades de carga adquiridos por meio da equação (10). A bateria nova apresentou 17.16 Ah de quantidade de carga e 38.13% de estado de carga,



enquanto que a bateria velha apresentou 2.57 Ah de capacidade e 5.71% de estado de carga.

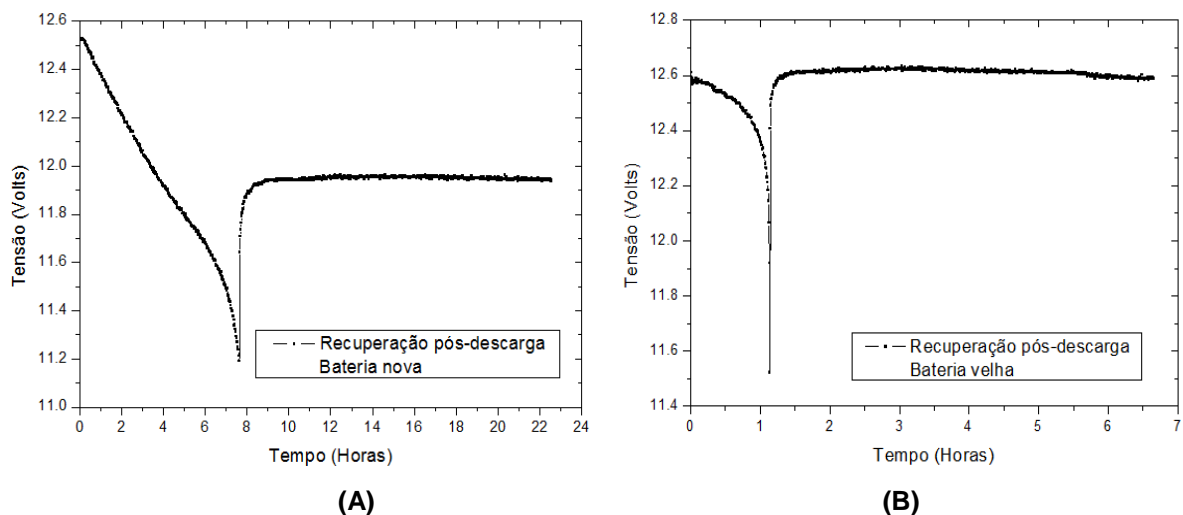
A partir das estimativas dos estados de carga, se percebeu que a bateria velha aparenta estar bem fora da vida útil, com apenas 5% do estado de carga e sendo descarregada em aproximadamente 1 hora. Era esperada da bateria nova uma descarga de aproximadamente 20 horas e aproximadamente 100% do estado de carga, porém isso não ocorreu. Ela foi descarregada em quase 8 horas e obteve 38% do estado de carga.

Um dos motivos da bateria nova ter apresentado esse valor é o fato de que o fabricante especifica que para descarga em corrente constante, a tensão de parada deve ser de 10.5 volts, porém por razões de segurança e para preservação da sua vida útil o valor arbitrário de 11.2 volts foi escolhido.

Outro motivo que deve ser levado em consideração é a perda de capacidade por estratificação do eletrólito devido ao fato de que as baterias sofreram vários ciclos de carga e descarga em outros experimentos e por terem permanecido um período armazenadas descarregadas, o que favorece o fenômeno de sulfatação e por sua vez perda de capacidade (CATHERINO, 2004).

#### 4.4. RECUPERAÇÃO PÓS-DESCARGA

Após a descarga o sistema muda automaticamente o modo de aquisição de dados de tensão e corrente em descarga para tensão em circuito aberto. A figura 43 mostra as curvas de recuperação pós-descarga das duas baterias obtidas a partir dos dados adquiridos pelo sistema.



**Figura 43.** Curvas de recuperação pós-descarga da bateria nova (A) e bateria velha (B).

Assim como as curvas de recuperação pós-carga as curvas de recuperação pós-descarga são exponenciais. Inicialmente se observa um aumento brusco na tensão seguido de um aumento mais suave após certo tempo.

## 5. CONCLUSÃO

Foi projetado, desenvolvido e testado um sistema de aquisição de dados de baterias de chumbo-ácido, capaz de obter informações como tensão e corrente em descarga a corrente constante e tensão em circuito aberto.

O sistema de descarga em corrente constante se mostrou estável após as mudanças na estrutura de dissipação.

O sistema microcontrolado funcionou dentro do esperado executando os comandos de acionamento do relé e realizando a leitura de tensão e corrente da bateria, além fornecer comunicação estável com o *software*.

O software também se mostrou estável do ponto de vista de comunicação, calibração dos conversores AD, interface com o usuário e salvamento dos valores de tensão e corrente em arquivos.

Uma vez o sistema montado, foi realizado a calibração do conversor AD e testes de aquisição de dados utilizando duas baterias de chumbo ácido, uma velha e uma nova, ambas de mesmo fabricante e capacidade de 45 Ah. Os testes foram realizados com intuito de avaliar a estabilidade e o comportamento do sistema como um todo.

Através dos dados dos testes salvos em arquivos foi possível plotar curvas de carga, de recuperação pós-carga, descarga, recuperação pós-descarga e corrente.

Foi possível ainda a partir desses dados determinar o estado de carga das baterias. Essas informações são importantes para o gerenciamento das baterias de chumbo-ácido nas aplicações.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O sistema se mostrou estável em todos os testes realizados e capaz de fornecer dados para obtenção de varias informações importantes para gerenciamento das baterias. Contudo, algumas melhorias poderiam ser feitas no sistema, por exemplo, a faixa de descarga que atualmente é de 1.8 a 6 ampere de descarga. O circuito poderia ser projetado para uma faixa maior de intensidades de corrente de descarga, contemplando assim não somente baterias entre 38 Ah e 105 Ah de capacidade.

Um sensor de temperatura poderia ser utilizado para monitoramento da temperatura da bateria durante os testes, esse parâmetro é importante uma vez que influencia em seu desempenho.

No *hardware* de comunicação do circuito microcontrolado existe um circuito integrado que permite a comunicação em padrão RS-485. Este padrão permite uma comunicação em rede do tipo mestre/escravo, onde um mestre pode coordenar até 32 escravos na rede. Assim, uma possibilidade seria interligar algumas réplicas da unidade de teste desenvolvida para aquisição de dados um conjunto de baterias, como já é feito pelo sistema de ensaio desenvolvido para o OPA. Isso aumentaria a eficiência das campanhas de teste, uma vez que cada ação de descarga demanda aproximadamente 20 horas.

## REFERÊNCIAS

- AYLOR, JAMES. A. **A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs.** *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 39. 1992.
- SCHIEMAN. **Hydrogen gas management for flooded lead acid batteries.**
- BARBOSA, A, F. et al; **Batteries performance characterization I.** GAP2007022, Observatório de raios cósmicos Pierre Auger, 2007.
- BOSCH. **Manual de baterias bosch.** Disponível em:<  
[http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/baterias/downloads/manual\\_nova\\_bateria.pdf](http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/baterias/downloads/manual_nova_bateria.pdf)  
 >Acesso em: julho de 2012.
- CATHERINO, H.; FERES, F. **Sulfation in lead-acid batteries.** *Journal of power sources*, 129, 113-120. 2004.
- CDTECHNO, **Charging valve regulated lead acid batteries.** Disponível em: <  
[http://www.cdtechno.com/pdf/ref/41\\_2128\\_0212.pdf](http://www.cdtechno.com/pdf/ref/41_2128_0212.pdf)>. Acesso em: dezembro de 2013.
- COPETTI, J. B, MACAGAN, M. H., **Baterias em sistemas solares fotovoltaicos.** I congresso brasileiro de energia solar, Fortaleza, 2007.
- COPETTI, J. B., **Modelado de acumuladores de chumbo-ácido para aplicaciones fotovoltaicas.** Tese de doutorado (Doutorado em engenharia), Universidad politécnica de Madrid, Madrid, 1993.
- DEEPTI, D. JAYA, RAMANARAYANAN, V. **State of charge of lead-acid battery.** *Proceedings of india international conference on power electronics*, 2006.
- DELAILLE, A., PERRIN. M., HUET, F., HERNOUT, L. **Study of the "coup de fouet" of lead-acid cells as a function of their state-of-charge and state-of-health.** *Journal of power source*, 2006,1019-1028.
- DEMETINO, G. G; FILARDI, V. L. **Influencia del tiempo de recuperación de las baterias de plomo-ácido en la cantidad de carga.** *XI Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica*, 2013.
- ENERGY Products. **Rechargeable batteries applications handbook.** Elsevier,23-27. 1998
- GU, W. B.; WANG, G. Q.; WANG, C. Y. **Modeling the overcharge process of VRLA batteries.** *Journal of Power Sources*, v. 108, n. 1-2, p. 174-184, jun. 2002.
- HUET, F. **A review of impedance measurements for determination of the state-of-charge or state-of-health of secondary batteries.** *Journal of power sources*, 1998, 59-69.
- HUGGINS, Robert. A. **Energy Storage.** New York: Springer, 2010.

KOUTROULIS, E.; KALAITZAKIS, K. **Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications.** *Electric power applications IEEE*, 191-197, 2004.

LUCZKIEVICZ, F. R. G. **Determinação do estado de saúde da bateria de chumbo-ácido.** (Dissertação) de mestrado do programa de pós-graduação em química aplicada. Universidade estadual do centro-oeste.

MISCHIEN, S.; TOMA, LIVIU. **Behavior of the lead-acid battery after rest period.** *WSEAS on transactions on power systems*, 2008.

MODBUS, **Modbus specifications and implementation guides.** Disponível em: <<http://www.modbus.org/specs.php>> Acessado em dezembro 2012.

MOURA, José Fernando Cánovas. **Caracterização de baterias para uso solar fotovoltaico.** 1996. Disponível em: <<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/moura.pdf>>. Acesso em: 20/04/2011

MOURA BATERIAS,  
<http://manoel.pesqueira.ifpe.edu.br/fmn/anterior/2010.2/infra/CLEAN.PDF>. acesso em:  
 janeiro 2012.

NG, K. S., MOO, C. S, CHEN, Y. P. **State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage.** *International conference on power and energy (PECon 08)*, 2008.

PILLER, S., PERRIN, M., JOSSEN, A. **Methods for state-of-charge determination and their applications.** *Journal of power sources*, 2001, 113-120.

RUETSCHI, P. **Aging mechanisms and service life of lead-acid batteries .** *Journal of power sources*, 33-44, 2004.

SATO, S, KAWAMURA, A. **A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead-acid battery.** *IEEE*, 2002.

SINCLAIR, P. G. **An adaptive battery monitoring system for an electric vehicle.** 1998

RAND, D. A. J. **Valve-regulated lead-acid batteries.** 2004.

SPIERS, D. J.; RASINKOSKI, A. D. **Predicting the service lifetime of lead/acid batteries in photovoltaic systems.** *Journal of power sources*, 53:245:253, 1995.

YAN, J. **A study on quick charging method for small VRLA batteries.** *Journal of power sources*, 158:1047:1053, 2006

## Apêndice 1 – Código do *firmware*

```

////////////////////////////////////
//          PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO BASEADO NO PROTOCOLO MODBUS          //
////////////////////////////////////
//          FORMATO DO PACOTE "REQUEST"                                   //
////////////////////////////////////
//-----//
// | ID | FUNC | REG_H | REG_L | DATA_H | DATA_L | CRC_L | CRC_H | //
//-----//
// 1 byte 1 byte 1 byte 1 byte 1 byte 1 byte 1 byte 1 byte //
//-----//

////////////////////////////////////
//          FORMATO DO PACOTE "REPLY/RESPONSE"                           //
////////////////////////////////////
//-----//
//          | ID | DATA | CRC_L | CRC_H | //
//-----//
//          1 byte 27 bytes 1 byte 1 byte //
//-----//
//-----DATA-----//
//---Tipo 1-----,TENSAO,CORRENTE,TEMPERATURA,S_RELAY1,S_RELAY2,-----//
//-----//
// //
//
////////////////////////////////////
//          FUNCOES DO PROTOCOLO                                         //
////////////////////////////////////
/*
código
do comando      descrição
  01             Lê um número variável1 de saídas digitais (bobinas)
  02             Lê um número variável1 de entradas digitais
  03             Lê um número variável1 de registros retentivos
                 (saídas analógicas ou memórias)
  04             Lê um número variável1 de registros de entrada
                 (entradas analógicas)
  05             Força uma única bobina (altera o estado de uma saída digital)
  06             Preset de um único registro (altera o estado de uma saída
                 analógica)
  07             Lê exceções2 (registros de erro)
  08             Várias funções de diagnóstico
  15             Força uma quantidade variável1 de bobinas (saídas digitais)
  16             Preset de uma quantidade variável1 de registros
                 (saídas analógicas)
1 A quantidade de variáveis a ler é definida no frame de solicitação
2 Oito bits previamente configurados. Não é necessário fornecer parâmetros
  de endereçamento com este comando pois o escravo vai enviar sempre os oito
  bits pré configurados.
*/
////////////////////////////////////
#include "baterias_lib.h"
/*DEFINIÇÕES DE USO GERAL */
#define BUFFER_SIZE 30
/*PINOS DE SAIDA */
#define VOLTS_C_ABERTO 0 // PORTA A5
#define VOLTS_DESCARGA 0 // PORTA A0
#define AMP 1 // PORTA A1

```

```

//#define RELAY PIN_A2 //RA2 utilizado como Vref-
#define RELAY_1 PIN_D1 //Aciona relé 1
#define RELAY_2 PIN_E2 //Aciona relé 2
#define TEMP 3 // PORTA A3
#define EN_RS485 PIN_C5 // Pino de controle do RS485
#define AD_resolv 0.017717497
#define VBaixo 145 // Contagens em AD para desligamento automático
#define contVBaixo 10 // Num. de leituras para desligamento automático

/* Variaveis Globais */
unsigned int8 ID;
char buffer[BUFFER_SIZE];
int1 CRC16(unsigned int dataLenght, char check);
char timed_getc();
int1 timeout_error;
char string[BUFFER_SIZE-2];
long int tensao,amperes,temperatura; // valor medido no ADC
unsigned int1 S_relay = 0;
unsigned int1 S_relay2 = 0;
//int8 S_RELAY =0;
//int8 S_RELAY2 = 0;
float tensao2=0;
int cont=0;

#int_rda
void serial(void)
{
//unsigned int16 CRC_Received;
unsigned int16 CRC_Calculated;
unsigned int i;
cont=0; // Zera o valor de contagem em failsafe

i=0;
/* Desligando interrupções */
//disable_interrupts(global);
while(i<8){
buffer[i]=timed_getc();
i++;
if(timeout_error) {
break;
}
}
/* Verificando CRC e ID */

buffer[0] = ID; //Atribuindo ID ao primeiro byte do pacote

if (CRC16(6,1)){
//-----Acionar os relays-----
//-----Relay 1-----
//-----
if ((buffer[1]==15)&& (buffer[3]==0) && (buffer[5]==1)){
// LIGA RELÉ 1
output_bit(RELAY_1,1);
S_relay=1;
sprintf(string,"Relay On,");
}
if ((buffer[1]==15)&& (buffer[3]==0) && (buffer[5]==0)){
// DESLIGA RELÉ 1
output_bit(RELAY_1,0);
S_relay=0;
sprintf(string,"Relay Off,");
}
}

```



```

    }
//-----
//-----Relay 2-----
//-----
    if ((buffer[1]==15)&&(buffer[3]==1)&&(buffer[5]==1)){
// LIGA RELÉ 2
    output_bit(RELAY_2,1);
    S_relay2=1;
    sprintf(string, ",Relay 2 On,");
    }
if ((buffer[1]==15)&&(buffer[3]==1)&&(buffer[5]==0)){
// DESLIGA RELÉ 2
    output_bit(RELAY_2,0);
    S_relay2=0;
    sprintf(string, ",Relay 2 Off,");
    }
//-----
//-----Leitura-----
//-----
    if (buffer[1]==3){

//Desabilita o Fail-Safe
if (buffer[5]==1) disable_interrupts(INT_RTCC);

if(buffer[3]==0)
{
    S_relay=input_state(relay_1);
    S_relay2=input_state(relay_2);
    set_adc_channel(VOLTS_C_ABERTO);
    delay_us(10);
    tensao = read_adc();
    amperes = 0;
    set_adc_channel(TEMP);
    delay_us(10);
    temperatura = read_adc();
    // temperatura = 0;
}
else if(buffer[3]==1)
{
    // Aquisicao normal
    S_relay=input_state(relay_1);
    S_relay2=input_state(relay_2);
    // LÊ CORRRENTE DO CIRCUITO
    set_adc_channel(AMP);
    delay_us(10);
    amperes = read_adc() ;
    // LÊ TENSAO DA BATERIA
    set_adc_channel(VOLTS_DESCARGA);
    delay_us(10);
    tensao = read_adc();
    // LÊ TEMPERARURA DO TRANSISTOR
    set_adc_channel(TEMP);
    delay_us(10);
    temperatura = read_adc();
    // temperatura = 0;
}

// JUNTA AS INFORMACOES NA VARIABEL STRING
sprintf(string, "%lu,%lu,%lu,%d,%d", tensao, amperes, temperatura, S_RELAY, S_RELAY2);

```

```

    }

    //////////////////////////////////// RESPOSTA DA SOLICITACAO////////////////////////////////////

    for (i=2;i<BUFFER_SIZE;i++) //Armazenamento em buffer
    {
        buffer[i]=string[i-2];
    }

    delay_us(10);
    CRC16(BUFFER_SIZE-2,0); //Calculo de CRC
    output_bit(EN_RS485,1); //Preparando para enviar
    delay_ms(10);

    //fprintf(RS485,buffer);
    for (i=0;i<BUFFER_SIZE;i++) //Enviando
    {
        fputc(buffer[i], RS485);
    }

    delay_ms(10);
    output_bit(EN_RS485,0);
}

////////////////////////////////////// CRC ////////////////////////////////////////
//
//
//////////////////////////////////////
int CRC16(unsigned int dataLenght, char check)
{
    unsigned long CheckSum;
    char j, lowCRC, highCRC, i;
    int1 bite;
    CheckSum = 0xffff;

    for(j=0;j<dataLenght;j++)
    {
        CheckSum = CheckSum^buffer[j];
        for(i=8;i>0;i--)
        {
            bite = CheckSum & 0x01;
            CheckSum = CheckSum >> 1;
            if(bite) CheckSum = CheckSum ^ 0xa001;
        }
    }
    highCRC = CheckSum>>8;
    CheckSum<<=8;
    lowCRC = CheckSum>>8;
    if (check)
    {
        if((buffer[dataLenght+1] == highCRC) && (buffer[dataLenght] == lowCRC))
            return 1;
        else
            return 0;
    }
    else
    {
        buffer[dataLenght] = lowCRC;
        buffer[dataLenght+1] = highCRC;
    }
}

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

```

```

char timed_getc() {
    long timeout;
    timeout_error=FALSE;
    timeout=0;

    while(!kbhit(RS485)&&(++timeout<400)) // 1/2 second
        delay_us(10);
    if(kbhit(RS485))
        return(fgetc(RS485));
    else {
        timeout_error=TRUE;
    }
}

#INT_RTCC
void display(void)
{
    // LÊ TENSÃO DA BATERIA
    set_adc_channel(VOLTS_DESCARGA);
    delay_us(10);
    tensao2 = read_adc(); // * AD_resolv;

    if (tensao2 < VBaixo)
    {
        cont++;
        if (cont > contVBaixo) // DESLIGA RELÉ
        {
            output_bit(RELAY_1,0);
            S_relay=0;
        }
    }
}

void main()
{
    //Configuração para Conversor Analógico/Digital
    // setup_adc_ports(AN0_AN1_AN4_VREF_VREF ); //A0 A1 A4 A5 VRefh=A3 VRef1=A2
    // setup_adc_ports(AN0_AN1_AN2_AN3_AN4 );
    setup_adc_ports(AN0_AN1_AN3);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

    // CONFIG DA INTERRUPTAO DO TIMER0
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_256);

    // Configuração de Interrupções
    enable_interrupts(INT_RTCC);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(GLOBAL);


    // RESISTOR DE PULL-UPS
    PORT_B_PULLUPS(1);

    ID = INPUT_B();

    fprintf(RS485,"LaPO v2.5,ID:%03u\r\n",ID);
    output_bit(RELAY_1,0);
    output_bit(RELAY_2,0);
    output_bit(EN_RS485,0);

    // Aguarda interrupção
    while(1){ } }

```

	European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ)	International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012
---	--	---

## Estimating the estate of charge of lead-acid batteries.

G. G. Demetino<sup>1,2</sup>, I. M. Pepe<sup>2</sup>, V. L. Filardi<sup>2</sup>, L. C. S. Soares Júnior<sup>2</sup>, C. E. T. Silva<sup>2</sup>, G. P. Guedes<sup>3</sup>, J. G. Lima Brasília<sup>3</sup>, D. Rey Rey<sup>4</sup>, A. L. Aguera<sup>4</sup>, J. C. Anjos<sup>5</sup>

<sup>1</sup> PPGM – Programa de pós-graduação em Mecatrônica

Universidade Federal da Bahia – Salvador (Brasil)

e-mail: [jdemetino@gmail.com](mailto:jdemetino@gmail.com)

<sup>2</sup>Laboratório de Propriedades Óticas

Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia

Campus de Ondina – Salvador, 40210 340 – Salvador (Brasil)

Phone/Fax number:+0071 3283 6619, e-mail: [jdemetino@gmail.com](mailto:jdemetino@gmail.com), [lapo.if@gmail.com](mailto:lapo.if@gmail.com), [mrfilardi@hotmail.com](mailto:mrfilardi@hotmail.com), [luiz\\_carlos\\_simoes@hotmail.com](mailto:luiz_carlos_simoes@hotmail.com), [eduardotanajura@gmail.com](mailto:eduardotanajura@gmail.com),

<sup>3</sup> Laboratório de Instrumentação e Energia Solar

Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana

Feira de Santana (Brasil)

Phone/Fax number:+0075 3161 8289 , e-mail: [germano.uefs@gmail.com](mailto:germano.uefs@gmail.com), [joseandro.brasilio@ig.com](mailto:joseandro.brasilio@ig.com)

<sup>4</sup> Laboratorio de Aplicaciones Energetica Sostenibles

Departamento de Física de Partículas, Universidad de Santiago de Compostela

Campus Vida – Santiago de Compostela, 36310 Vigo (Spain)

Phone/Fax number:+0034 981563100 Ext:14000, e-mail: [daniel.rey.rey@gmail.com](mailto:daniel.rey.rey@gmail.com), [a.lopez.aguera@gmail.com](mailto:a.lopez.aguera@gmail.com)

<sup>5</sup> Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Rio de Janeiro (Brasil)

e-mail: [janjos@cbpfl.br](mailto:janjos@cbpfl.br)

**Abstract.** A new system approach for battery discharge to estimate the state of charge of lead-acid batteries has been developed and tested. This new system is based on an industrial network that runs the Modbus Protocol with RTU format. Each unit includes an ID for communication in this network, its own power supply, a stable current supply for battery discharge and its own calibration curve for each channel at the analogical-digital converter. All parameters can be configured by the software supervisor. This system is able to discharge up to 16 batteries

simultaneously and save voltage and current values for each unit. All information can be saved into a file that can be read simultaneously to the data acquisition. Thus, it is easier to have it integrated to a database and distributed on to a computing network system. This system will bring more information to the battery ageing estimator, based on the observed voltage distributions over one month. The Pierre Auger Observatory works with different set-ups for the 1600 PV-stand-alone systems. Therefore, a larger scale system capacity to test each battery unit a time has become necessary.

## Key words

State of charge, battery discharge, Modbus protocol.

## 1. Introduction

The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory studies high energy particles that reach the Earth. These particles are detected in two different ways: a set of three fluorescence detector fly-eye type and 1600 surface Cherenkov detectors [1].

Each surface detector has a photovoltaic stand-alone system which is composed of two solar panels and two 105 Ah lead-acid batteries. The detectors performance is directly affected by the quality and quantity of the lead-acid battery stored charge.

The replacement of one or both batteries requires high maintenance costs, due to the fact that the detectors are distributed in a 3000 Km<sup>2</sup> area and the access is difficult. Moreover, bad batteries affect the whole detecting array performance.

For this reason it is necessary determine the state of charge of lead-acid batteries, since this parameter provides information about the quantity of charge stored and capability to retain charge. The state of charge must be known before the batteries are installed on the field. It can bring more information to estimate the battery ageing and life-time.

The State of Charge (SoC) is estimated by means of the amount of charge obtained over the discharge curve and the time necessary to discharge the battery. The curve is built by the battery voltage as a function of time during the battery discharge [2]. To perform this process equipment has been developed and tested. It is capable of storing voltage and current values using the discharge at constant current method to determine state of charge. These values are used to plot the discharge curve, allowing the amount of charge and SoC calculation.

## 2. State of charge and method of discharge at constant current

State of charge is defined as the relation between the amount of charge in the battery, at a given moment, and the amount of charge when the battery is new (100% storing capability).

The state of charge can be calculated using the equation (1), where  $Q$ , the quantity of charge at a given moment and  $Q_0$  is the quantity of charge when the battery is new, that also called battery capacity [2].

$$SoC = \frac{Q}{Q_0} \quad (1)$$

The SoC is an important information to guesstimate lead-acid batteries performance before its installation in photovoltaic systems as the Pierre Auger Observatory surface detector. On PAO the batteries are located 1.5 Km apart from each other and the access is very difficult (land road). This way, its mandatory send to the field just batteries passing the SOC quality test.

There are several methods to determine the SoC, one of them is discharge at constant current method. It consists in discharging the battery through a dynamic resistance capable of maintain the discharge current constant. The battery voltage is monitored during the discharge until a preset value (11.2 V). The figure 1 shows a diagram of the method.

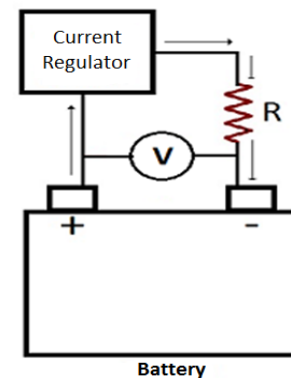


Fig 1. Constant current discharge method diagram.

Therefore, to calculate the SoC it is necessary to use the equation (1). But first, the quantity of charge  $Q$  needs to be obtained using the equation (2), where  $I$  is the current intensity and  $\Delta t$  is the time interval to discharge the battery.

$$Q = I\Delta t \quad (2)$$

Using the voltage values acquired during the discharge, the discharge curve can be plotted as a function of time. The graphic is important to analyse the voltage behaviour during the discharge. The figure 2 shows a typical discharge curve.

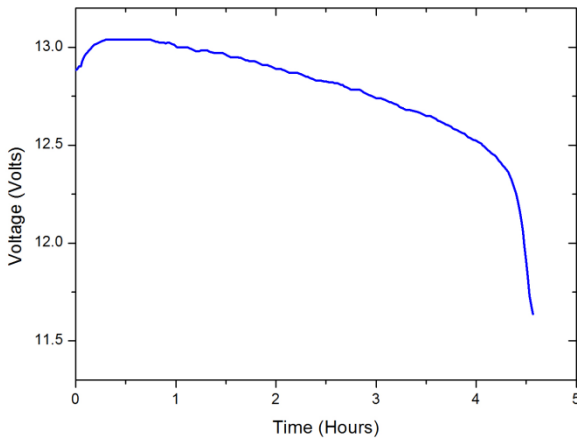


Fig 2. Typical discharge curve.

In the Pierre Auger Observatory, the SoC is estimated using a constant discharge current equal 5.25A, in less than 20 hours of a discharge regime. According to the manufacturer, under this condition, at 25° C, the battery furnishes 100 % its charge.

### 3. The system developed to determine the state-of-charge

The system comprises of electronic, mechanical and software components. To implement the discharge at constant current method, the battery is discharged through a constant current source. The constant current source electronics circuit comprises two metal wire power resistances, a power transistor and a constant current driver, responsible to the battery discharge control. Moreover, the current intensity can be adjusted aiming to perform testing on different capacities lead-acid batteries. The figure 3 shows the electronic diagram.

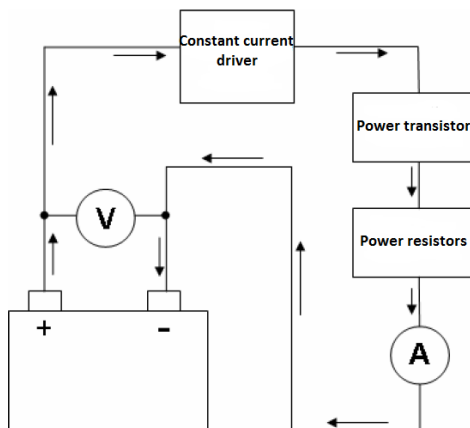


Fig 3. Electronic diagram

In this setup, the current flows through the power resistors and transistor which are heated. Therefore, the mechanical aluminium structure and three coolers are used to heat dissipation. The figure 4 shows the dissipation system.

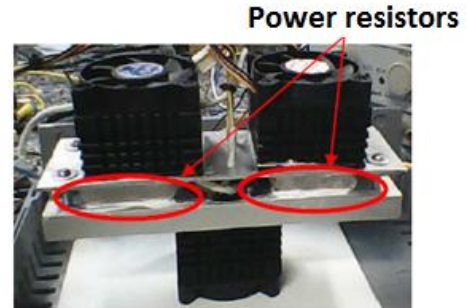


Fig 4. Dissipation system

A microcontroller is used to manage the electronic set: perform an analogical to digital conversion of the battery voltage and current and implements the communication protocol type Modbus. Furthermore, each microcontroller is responsible to establish communication with the supervisory software and each one has its own ID on the RS - 485 network. The figure 5 shows the electronic board.



Fig 5. Electronic Board

The system was built to perform the state of charge tests safely and stably. The units can be connected as a daisy-chain network based on RS - 485. Due to this network standard and the supervisory software, the test may be performed in 16 batteries simultaneously, what is an advantage, since each battery takes 20 hours to be discharged. The figure 6 shows the unit prototype.



Fig 6. Constant current discharger prototype.

The supervisory software has been written in Visual basic programming language. It manages the equipment and provides communication. It stores voltage and current values into files, each file corresponding to one equipment unit, implements Modbus communication protocol and stores calibration parameters. Figure 7 shows the supervisory software interface.

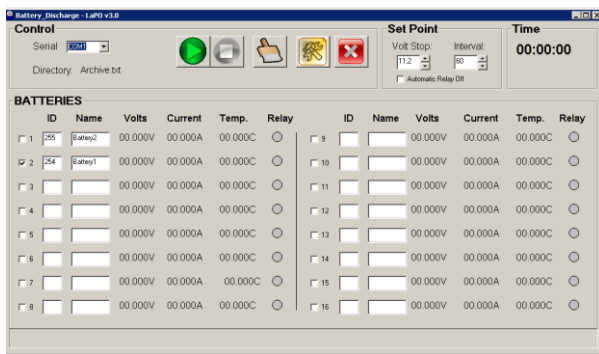


Fig 7. Supervisory software interface

#### 4. Results

As said before, to determine the state of charge, the battery needs to be discharged under 20 hours in constant current regime at 25° C of temperature. In the Pierre Auger, where 105 Ah stationary batteries are used, the SoC test is done at 5.25 Ampere [3].

Tests were performed on the laboratory using two equipment units and two batteries: a Moura© used battery with 60 Ah capacity and a new Zetta© battery with 45Ah capacity.

All the tests were performed in 5.25 A discharge regime as used in the Auger.

According to manufacturer, a battery is considered discharged when its output voltage reaches 10.5 Volts, but the batteries used in the test were discharged down to 11.2 Volts for safety reasons, a battery discharged down to 10.5 Volts can be irremediable damaged.

Both batteries were recharged before the test, the charge procedure adopted was to charge the battery over constant current using 10% of the battery capacity as charge current. Therefore, the 45Ah Zetta© battery was charged over 4.5A and the 60Ah Moura© over 6A.

In the first test, the 45Ah Zetta© battery was discharged using unit 255, the figure 8 shows the test result.

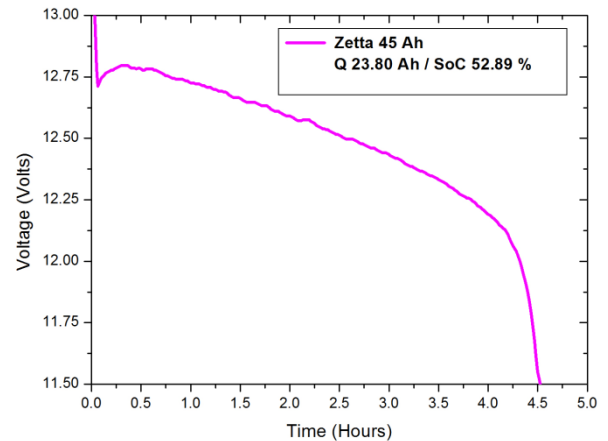


Fig 8. Zetta battery discharge curve.

This battery was discharged in 4 hours and 30 minutes, it represents 23.80 Ah of quantity of charge (Q), according to equation (2) and SoC of 52.89 %, using the equation (1). During this test the equipment was kept stable, with constant current, no overheating and no communication problems. The voltage and current values were stored into files on supervisory software without any problem.

The second test was performed with unit 254, using the 60 Ah Moura© battery, the figure 9 shows the discharge curve.

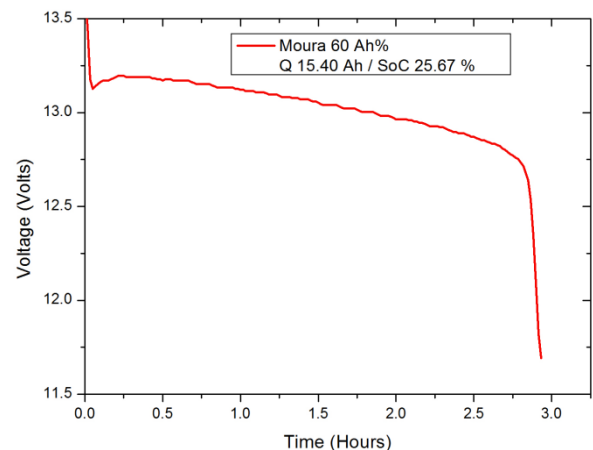


Fig 9. Moura battery discharge curve

This battery was discharged in 2 hours and 56 minutes and, as in the first test, the system was kept stable. It



presented 15.40 Ah of quantity of charge and 25.67 % of SoC.

A third test was carried out using the equipment units, 254 and 255, connected as a network to perform tests in both batteries simultaneously. The same batteries Zetta© and Moura© were used. This test aimed to validate the communication, the RS – 485 network and whether the supervisory software manages more than one unit. Figure 10 shows the discharge curves of each battery.

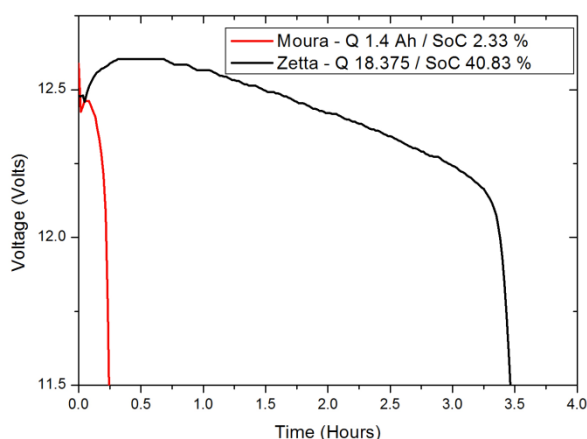


Fig 10. Discharge curves.

The Zetta battery was discharged in 3.5 hours whereas the Moura was discharged in approximately 0.27 hours (16 minutes). The Zetta battery capacity was 18.375 Ah and the SoC of 40.83 %. The Moura's capacity was 1.4 Ah and SoC of 2.33 %.

In all tests the batteries have presented low quantity of charge and SoC. There are several reasons that could explain this behaviour, such as temperature, discharge current values and battery age.

As said before, to obtain the state of charge of the 105 Ah batteries in the Auger, the discharge current needs to be 5.25 A. But since the batteries used in the laboratory tests needed to be performed at 2.25 A for Zetta© and 3 A for Moura©, this was not the case and 5.25 A was adopted in all tests, aiming to make sure the equipment maintained the current constant in this value. However, using this current value the Zetta© and Moura© cannot deliver 100%.

The Tests were performed mainly to validate the system, that is, check the electronics, mechanics, software and data acquisition. The calculations of quantity of charge and state of charge were carried out only to figure out the quantity of charge.

In all tests it could be clearly realized that the state of charge might be estimated over quantity of charge, acquired using the discharge curve obtained using the data stored.

## 5. Conclusion

The equipment was built and tested. During the tests it was clearly realized that it works, the electronics kept stable, no communication problems came up, data acquisition was well performed and the discharge curves could be plotted using it, since the curve is important for analyse the battery drop voltage

At the Auger tests will be performed in the batteries which were recently bought and are stored for a long time. This way, only good batteries will be installed on the surface detector, that is, batteries which present good quantity of charge and SoC. As a result, it presents less battery failures, less Photovoltaic system failures and thus, the surface detection performance is not affected.

There are today five equipments like that in the Auger Observatory acquiring data, interconnected and discharging batteries simultaneously. The results will be analysed as soon as the data are received.

## Acknowledgement

The authors wish to thank all the team from Optical Properties Laboratory, Instrumentation and Solar Energy Laboratory, Sustainable Energetic Applications Laboratory, The Pierre Auger Observatory and CBPF.

## References

- [1] ALLEKOTTE, I; [BARBOSA, A. F](#) ; BAULEO, P.; PEPE, I. M. (2008) The Surface Detector System of the Pierre Auger Observatory. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A. v. 586, p. 409-420.
- [2] Ademarlaudo França Barbosa, Iuri Muniz Pepe, Germano Pinto Guedes, Luis Carlos Simões Soares, A. López Agüera, I. Rodríguez Cabo, María de Fátima N. C. Rossolem. Batteries performance characterization – I. GAP2007022 (internal publication of the experiment).
- [3] BATERIAS Moura: Manual técnico acumuladores Moura S.A, Available in: <http://manoel.pesqueira.ifpe.edu.br/fmn/anterior/2010.2/infra/CLEAN.PDF>. Accessed at: 02/10/2011.



**Anexo 2 – Artigo publicado no XI Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica  
(CIBIM 2013, La plata)**

**Influencia del tiempo de recuperación de las baterías de plomo-ácido en  
la cantidad de carga.**

**Demetino, G. G.<sup>1,4</sup>, Filardi, V. L.<sup>2,4</sup>, Anjos, J. C.<sup>3</sup>, Pepe, I. M.<sup>4,5</sup>,**

- 1- Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM), Universidade Federal da Bahia (UFBA). jdemetino@gmail.com
- 2- Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica (PPGM), Universidade Federal da Bahia (UFBA). mrfilardi@hotmail.com
- 3-Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Rio de Janeiro, Brasil janjos@gmail.com
- 4-Pesquisador no Laboratório de Propriedades Óticas (LAPO), Salvador, Brasil
- 5-Coordenador do Laboratório de Propriedades Óticas (LAPO), Salvador, Brasil

**Palabras clave:** estado de carga, energía solar fotovoltaica, tiempo de recuperación.

**Resumen**

En este trabajo se investigó la influencia del tiempo de recuperación, entre 0 y 6 horas, tras carga en la capacidad disponible de baterías de plomo-ácido, una vez que hay sistemas donde las baterías no tienen tiempo de recuperación durante su operación y hay baterías donde los fabricantes recomiendan cierto tiempo de recuperación pos carga.

En los experimentos fueron realizados 7 ciclos de carga y descarga utilizando dos baterías de automóviles de la misma capacidad y modelo, una nueva, nunca antes utilizada y otra vieja, con 30% del estado de carga. Además, fueron analizados también el estado de carga de las baterías, la diferencia entre el comportamiento de las dos baterías, las gráficas de descarga y de recuperación pos carga. Los resultados experimentales mostraron que las curvas de recuperación pos carga pueden ser utilizadas para obtener el tiempo que una batería lleva para tener su voltaje de circuito abierto estable y que las baterías tuvieron influencia del tiempo de recuperación pos carga en su capacidad.

## 1. Introducción

La generación de energía a través de fuentes renovables es cada día más utilizada en residencias y en el comercio, sea para reducir el impacto al medio ambiente, para reducir costos o como única alternativa de obtener energía eléctrica. Sistemas de energía solar fotovoltaica y energía eólica son ejemplos de sistemas bastante conocidos y utilizados, sus fuentes son suficientemente abundantes en el medio ambiente. En algunos casos, una parte del proceso de generación de energía eléctrica, a partir de estos sistemas, incluye el almacenamiento de la energía generada con el objetivo de ser utilizada en momentos donde no hay o hay poca oferta de energía. Por ejemplo, la velocidad del viento fuera del intervalo ideal de captación, en el caso de sistemas eólicos o poca irradiación solar o tiempo nublado, en el caso de los sistemas fotovoltaicos.

Las baterías de plomo-ácido son dispositivos bastante utilizados para almacenamiento de la energía eléctrica generada por estos sistemas, son bastante estables desde el punto de vista de abastecimiento de energía, tienen buenos precios y buena tolerancia a ciclos de carga y descarga. En sistemas fotovoltaicos, varios tipos de baterías son utilizadas, el régimen del sistema es que determinará el tipo de batería más adecuada. Baterías estacionarias y baterías para automóviles, son ejemplos de tipos de baterías utilizadas, siendo las de automóviles más baratas, sin embargo tienen menos vida útil que las estacionarias y no soportan descarga profunda, en general son utilizadas en sistemas de pequeño porte. Las baterías de plomo ácido son dispositivos muy inestables en relación a su capacidad, es decir, son dependientes de la temperatura de operación y de la intensidad de la corriente de descarga. Así, mientras más conocimiento se tiene acerca de las características que afectan la capacidad de estas baterías mejor podrán ser gestionadas y así aumentar su rendimiento. En el Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger, en Malargüe-Argentina, por ejemplo, son utilizados sistemas de energía solar fotovoltaica aislados para suministrar la energía utilizada por la electrónica de sus sistemas de detección de partículas y la capacidad de las baterías son siempre analizadas antes de instalarlas en campo [1]. La gestión de baterías es importante una vez que hay sistemas localizados en sitios de difícil acceso y el costo de mantenimiento para sustitución de baterías defectuosas puede ser alto, además en sistemas de energía fotovoltaica, por ejemplo, las baterías representan gran parte de los costos de instalación [2].

Una característica que también puede influir la capacidad de la batería es el tiempo de recuperación, en [3] es mostrado el efecto del tiempo de recuperación en la cantidad de carga suministrada por la batería. Algunos de los fabricantes de baterías recomiendan que después de la carga, las baterías deban permanecer en recuperación por cierto tiempo.

En este trabajo fue analizada la influencia del tiempo de recuperación pos-carga en el estado de carga (SoC) de dos baterías similares de plomo ácido selladas, con electrolito en la forma líquida, con capacidad de 45 Ah, utilizada para arranque en automóviles. De esta forma, siendo las baterías similares (mismo fabricante y modelo), una de ellas ya se encontraba hacía tiempo en el laboratorio y se podía considerar vieja, con cerca de 30% de su estado de carga. La segunda batería acababa de ser comprada, siendo por lo tanto nueva, nunca antes utilizada y con supuestamente 100% de su SoC. También fueron analizadas las curvas de descarga y de recuperación pos-carga y pos-descarga, utilizando un equipo desarrollado en laboratorio. El objetivo fue determinar si, en las pruebas realizadas, hay influencia del tiempo de recuperación después de la carga de la batería en su cantidad de carga suministrada, una vez que en los sistemas fotovoltaicos, dependiendo del tipo de la aplicación, las baterías son sometidas a intensos ciclos de carga y descarga [4], [5] y así no hay tiempo de recuperación después de cada ciclo.

## 2. Tiempo de recuperación

El tiempo de recuperación es el período en el cual la batería no está siendo cargada ni descargada [3]. Esta es una característica importante para las aplicaciones, una vez que las baterías de algunos fabricantes recomiendan que después de la carga, ella permanezca en recuperación, a veces de 4 a 24 horas [6]. Hay trabajos en la literatura donde se estudia el comportamiento de las baterías en relación a su tiempo de recuperación, en [3] se muestra que si la batería tiene periodos de recuperación durante su descarga, [ella] puede suministrar un poco más de carga que la esperada y en [7] se muestra la influencia del tiempo de recuperación en las medidas del voltaje de circuito abierto y así el estado de carga.

## 3. Estado de carga y cantidad de carga

El estado de carga (SoC, del inglés *State-of-charge*) es la medida de la cantidad de carga disponible en la batería en relación a la cantidad de carga referente a una batería de mismo tipo y modelo, pero nueva. Se considera 100 % de cantidad de carga mientras la batería es nueva, nunca antes utilizada. El estado de carga es obtenido a través de la ecuación (1), donde Q es la cantidad de carga obtenida experimentalmente y  $Q_0$  la cantidad de carga de la batería nueva, o sea, referente a 100%. Para los sistemas fotovoltaicos el valor del estado de carga es importante, una vez que es utilizado por los controladores de carga para evitar sobrecargas y sobredescargas [6].

$$SoC = \frac{Q}{Q_0} \quad (1)$$

La cantidad de carga es obtenida, en este trabajo, a partir de la descarga de la batería en corriente constante, el valor de la corriente de descarga es igual a  $0,05 C$ , donde  $C$  es la capacidad total de energía almacenada en este acumulador. Se considera el final de la descarga cuando la tensión de la batería alcanza 10.5 voltios, pero las baterías utilizadas en este trabajo son de automóviles y así no suportan descarga profunda, de esta manera fue escogido el valor arbitrario de 11.2 V como voltaje final de descarga. Sin embargo, se determina la cantidad de carga a través de la multiplicación del tiempo de descarga por la intensidad de la corriente mediana de descarga.

Las baterías utilizadas tienen capacidad de 45 Ah, así para una descarga de 20 horas, el valor de corriente es,  $45\text{Ah}/20\text{ h}$ , o sea 2.25 A. Es una descarga lenta y similar al régimen de descarga de las baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos, eso es importante para tenerse un experimento más próximo del régimen de operación en campo.

#### 4. El equipo de adquisición de datos

El equipo fue desarrollado en el Laboratorio de Propiedades Ópticas (LaPo), de la Universidad Federal de Bahía (UFBA), él realiza medidas de voltaje, corriente y temperatura. Él está conectado a un ordenador, vía estándar RS-232, donde hay un *software* que hace, el control, gestión y salva los datos de adquisición en archivos de texto del tipo *.txt*, la figura 1 muestra una imagen del equipo.



Figura 1. Imagen del equipo de adquisición de datos para tests en corriente constante de baterías de plomo-acido.

El equipo desarrollado fue utilizado para medidas de voltaje durante la carga y la descarga de la batería, medidas de voltaje durante la recuperación pos-carga y la determinación del estado de carga.

#### 5. El experimento

El experimento fue realizado utilizando un cargador comercial de baterías para automóviles, las dos baterías, un polímetro, un resistor de *shunt* y el equipo de adquisición de datos, la figura 3 muestra el diagrama del experimento. En el experimento fueron realizados 7 ciclos de carga y descarga, cada uno con cierto intervalo de tiempo entre la carga y la descarga, llamado de tiempo de recuperación pos-carga. Por ejemplo, en el primer ciclo, la batería fue cargada y en seguida inmediatamente descargada. Posteriormente se realizó una nueva carga, seguida de 1 hora de recuperación y entonces empezó la descarga, este proceso se repite hasta un tiempo de recuperación de 6 horas. La tabla 1 muestra el procedimiento, conteniendo los ciclos y los tiempos de recuperación pos-carga, este procedimiento fue utilizado para las dos baterías, la vieja y la nueva. El experimento fue realizado en el laboratorio a temperatura ambiente de  $23^\circ\text{C}$ .

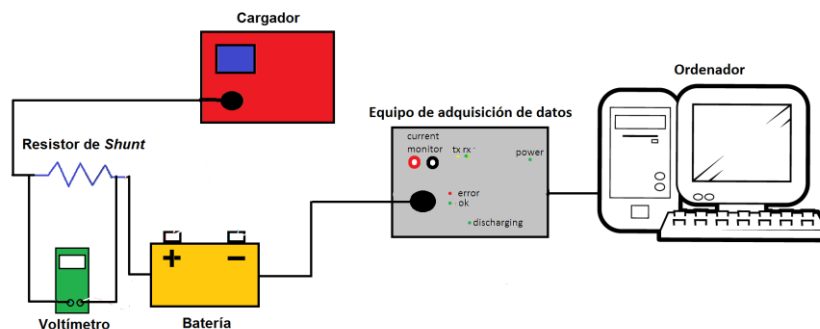


Figura 2. Montaje del experimento.

Tabla 1: Tiempos de recuperación

Ciclo	Recuperación pos-carga (horas)
1	0
2	1
3	2

4	3
5	4
6	5
7	6

Durante la carga de las baterías los valores de tensión y corriente fueron medidos a cada media hora utilizando el cargador comercial de baterías y el resistor de *shunt*. Al alcanzar aproximadamente 15 V, la carga fue considerada completa y el cargador se apagó, además el equipo de adquisición continuó encendido con la intención de obtener los datos durante el tiempo de recuperación. Hecho eso, la descarga comenzó y al final fue determinado el estado de carga de la batería.

### 5.1 La carga de las baterías

Las baterías fueron cargadas utilizando un cargador comercial que permite el ajuste del valor de corriente de carga. En la página web del fabricante, se intentó encontrar las características técnicas del cargador, pero no fue encontrado nada referente al método de carga que él proporciona. A pesar de ser una marca de cargadores de éxito en el mercado brasileño, la observación del funcionamiento de este cargador lleva a la conclusión que él no sigue ningún método de carga descrito en la literatura. Su corriente y tensión de carga varían a lo largo del tiempo fluctuando en función de la dinámica de la batería en proceso de carga.

Inicialmente el cargador fue ajustado para 4.5 A de corriente, este valor fue escogido segundo la norma brasileña para baterías de plomo-ácido utilizadas en sistemas fotovoltaicos, la NBR 14200. En ella se recomienda un valor de corriente de  $0.10 C$  ( $C$  capacidad total de la batería), para carga en corriente constante. Así, 45 Ah multiplicado por 0.10 es igual a 4.5 A. Independiente de que el valor de corriente suministrada por el cargador no ser constante, el valor de 4.5 A se queda como una referencia, para que el valor central del intervalo de variación sea éste (valor mediano).

Fue [percibido] comprobado que en el cargador disminuye la intensidad de corriente suministrada mientras la batería alcanza cierto valor de voltaje, se cree que eso sucede debido al hecho de este voltaje ser el nivel de gasificación y sobrecarga. En general, en la literatura es utilizado el valor de 14.4 V como siendo tal límite [4], [8]. Sin embargo, este voltaje varía de acuerdo con el estado de carga de la batería, su régimen de carga y su tipo [4]. Haciendo una carga de test, con la batería nueva y la vieja, fue percibido que los valores de corriente disminuían al alcanzarse el voltaje de 15 V, por lo tanto, fue escogido este valor como [siendo el] valor empírico de sobrecarga y gasificación, de esta manera el voltaje final de carga.

## 6. Resultados

### 6.1 Carga y recuperación

Utilizando los datos salvados en archivos por el equipo, el comportamiento de las baterías pudo ser analizado. Primero los tiempos de carga de las baterías se muestran en la tabla 2, referente a cada ciclo de la batería vieja y de la batería nueva. Se percibió una variación de los tiempos de carga entre los ciclos de las dos baterías. En la batería vieja, por ejemplo, en el ciclo 2 la batería precisó, para cargarse, solamente 66% del tiempo llevado en el ciclo 1 para una carga similar. Los ciclos 2, 3 y 4 tuvieron tiempos de recarga aproximadamente iguales a 50% del tiempo del ciclo 1 y finalmente, el ciclo 7 duró 37% de ese mismo tiempo. Mientras que en la batería nueva todos los tiempos de recarga fueron distintos, pero con diferencia más pequeña en relación a su primer ciclo. La diferencia más grande fue de 56% referente a los ciclos 5 y 7. La figura 3 muestra los tiempos de carga por ciclo de las baterías nueva y vieja.

Como hubo variación en los tiempos de carga entre los ciclos, la cantidad de carga tras la recarga de las baterías fueron estimadas, en cada ciclo, a partir de la integral de la curva de corriente de carga versus tiempo de carga. La tabla 2 muestra las cantidades de carga estimada de cada batería durante la carga bien cómo los estados de carga alcanzado.

Tabla 2: Tiempos de carga y cantidad de carga de las baterías.

Ciclo	Tiempo de recuperación pos-carga (Horas)	Tiempo de carga de la batería vieja (Horas)	Cantidad de carga estimada a partir de $I$ y $t$ en la batería vieja al termino de la carga (Ah)	Estado de carga de la batería vieja tras descarga	Tiempo de carga de la batería nueva (Horas)	Cantidad de carga estimada a partir de $I$ y $t$ en la batería nueva al termino de la carga (Ah)	Estado de carga de la batería nueva tras descarga
1	0	3.04	12.3	23.28	7.1	30.6	59.2
2	1	2.02	8.4	16.82	5.9	25.7	48.7
3	2	1.57	7	13.66	5.3	22.4	44.4
4	3	1.53	6.9	12.44	4.5	19.8	40.5
5	4	1.53	6.6	13.1	4	17.9	35.1
6	5	1.52	6.4	12.56	4.3	18.7	38.9
7	6	1.13	5.1	9.56	4	17.7	35.6

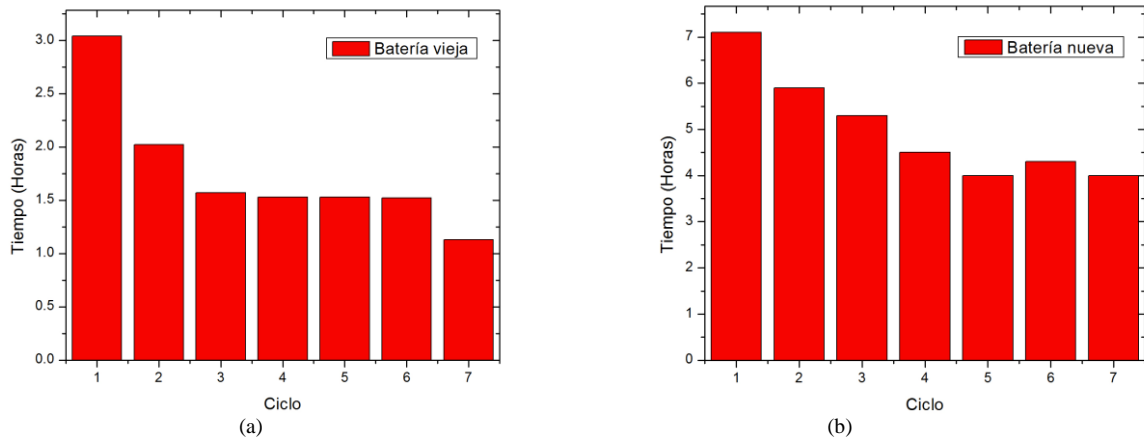


Figura 3. Graficas de los tiempos de carga de las baterías vieja y nueva referente a los ciclos.

Si percibió que así como los tiempos de carga, las cantidades de carga disminuyeron a cada ciclo. Por lo tanto, en general, a cada ciclo las baterías han sido menos cargadas y así tuvieron estados de carga más pequeños en relación al anterior.

Después de cada carga las baterías [se] quedaron desconectadas del cargador y del banco de resistores de descarga; interno al equipo de adquisición de datos, sin embargo la toma de datos no fue interrumpida durante los distintos tiempos de recuperación pos-carga y entre los ciclos se aprovechó para medirse la tensión de circuito abierto. La figura 4(a) muestra las curvas de recuperación pos-carga de la batería vieja referente a cada ciclo y la figura 4(b) muestra las curvas de la batería nueva. Las curvas son exponenciales y no hubo diferencia entre la forma de las curvas de la batería vieja y de la nueva. Se percibe que hay un cierto tiempo para que el voltaje de la batería se quede estable, en los primeros treinta minutos hay una caída bien marcada de la tensión, seguida de una caída más suave. Al final del tiempo de recuperación de cada ciclo, los valores del voltaje fueron anotados, la tabla 3 muestra estos tiempos juntamente con sus cantidades de carga. Para la batería vieja, mientras mayor sea el voltaje, mayor es la cantidad de carga, sin embargo, en las dos baterías hubo valores de voltaje iguales con cantidades de carga distintas, ciclos 5, 6 y 7. Un hecho curioso fue observado en el ciclo 2 de la batería nueva, mostrando un valor de tensión más pequeño al final de la recuperación si comparado con el ciclo 3, pero en este momento había más grande cantidad de carga en la batería.

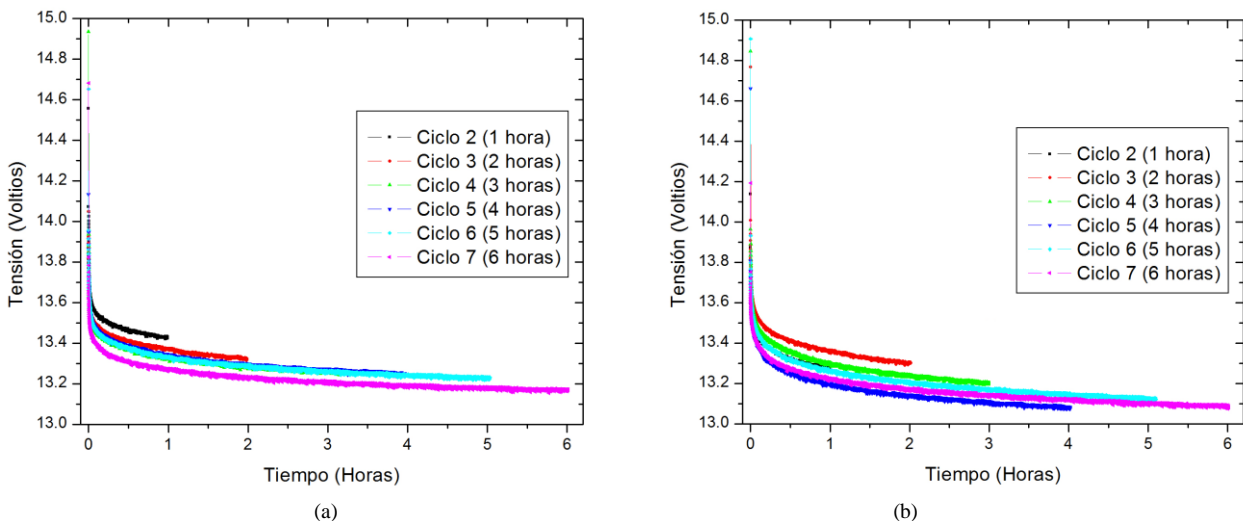


Figura 4. (a) curvas de recuperación pos-carga de la batería vieja y (b) curvas de recuperación de la batería nueva.

Tabla 3: Tiempos de recuperación y cantidad de carga.

Ciclo	Voltaje al final de la recuperación - vieja	Cantidad de carga en la batería vieja (Ah)	Voltaje al final de la recuperación - nueva	Cantidad de carga en la batería nueva (Ah)
-------	---	--	---	--

	(V)		(V)	
2	13.4	8.3	13.3	25.9
3	13.3	6.9	13.3	22.8
4	13.2	6.7	13.2	19.8
5	13.2	6.6	13.1	17.8
6	13.2	6.4	13.1	18.9
7	13.2	4.9	13.1	18.1

Los tiempos de recuperación son importantes para el proceso de difusión del electrolito [3], y así la estabilización de la tensión de la batería. Además, como mostrado en [7], la batería necesita de cierto tiempo de recuperación para estabilizar su tensión de circuito abierto y así tener precisión en las estimativas del estado de carga.

## 6.2 Descarga

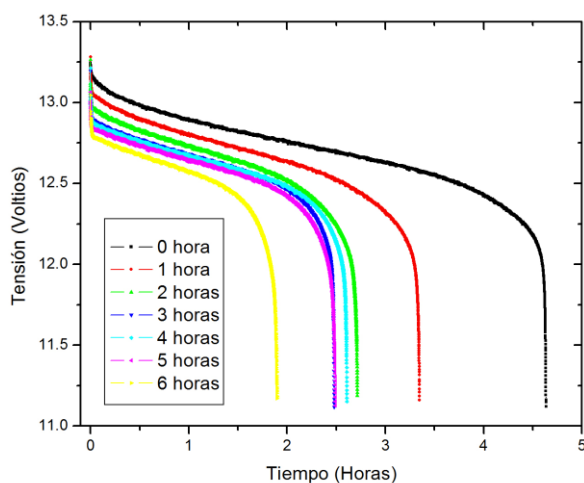
Después de la carga y de la recuperación, fue estimado el estado de carga de la batería en cada ciclo, la tabla 4 muestra los estados de carga y las cantidades de carga de las baterías. Los valores de estado de carga fueron obtenidos a partir de la ecuación (1) utilizando los valores de cantidad de carga. Se percibe que mientras mayor sea el estado de carga mayor fue la cantidad de carga suministrada a la batería durante la carga, independiente del tiempo de recuperación.

Tabla 4: Cantidades de carga y estado de carga después de la descarga.

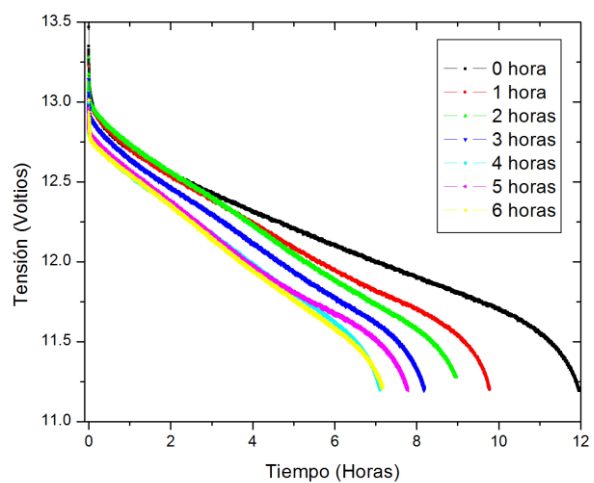
Ciclo	Cantidad de carga en la batería vieja (Ah)	Estado de carga de la batería vieja (%)	Cantidad de carga en la batería nueva (Ah)	Estado de carga de la batería nueva (%)
1	10.5	23.28	26.6	59.2
2	7.7	16.82	21.9	48.7
3	6.1	13.66	20.0	44.4
4	5.6	12.44	18.2	40.5
5	5.9	13.1	15.8	35.1
6	5.6	12.56	17.5	38.9
7	4.3	9.56	16.0	35.6

Como se comentó anteriormente, el estado de carga fue estimado a partir de la descarga de la batería en corriente constante, así la figura 5 muestra las curvas de descarga de las dos baterías referente a cada ciclo. La batería vieja está demasiado fuera de su vida útil, una descarga que debería durar aproximadamente 20 horas, duró 4 horas y 30 minutos en el ciclo 1. La nueva tuvo duración de aproximadamente 12 horas en el ciclo 1, mejor que la batería vieja, pero todavía lejos de una descarga de 20 horas o 100% del estado de carga. Esto es debido a su carga inicial, sin embargo sea una batería nueva nadie conoce seguramente su tiempo e condiciones de pos-producción: transporte y almacenamiento. Además, el voltaje final de descarga debería ser 10.5 V, pero por cuestiones de seguridad y preservación de la vida de la batería, se escogió un valor mayor, 11.2 V. Los valores presentados en la tabla 4, referentes a la energía suministrada durante la carga, dan una idea de la cantidad de carga que se iba a ser obtenida al final de la descarga.

Se percibió que en cada ciclo de las baterías hubo un disminución del tiempo de descarga y por su vez un valor más pequeño del estado de carga, lo mismo pasó con la batería nueva, excepto entre los ciclos 5 y 6, donde el ciclo 5 supuestamente debería tener un más largo tiempo de descarga que el 6. Sin embargo, la tabla 3 muestra que el ciclo 5 de la batería nueva tiene un más pequeño valor de estado de carga, eso explica el más corto tiempo de descarga en relación al ciclo 6.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Curvas de descarga de la batería vieja y (b) curvas de descarga de la batería nueva.

A partir de los experimentos se percibió pérdida de la capacidad de la batería a cada ciclo, la batería vieja en su último ciclo sufrió 60% de pérdida de capacidad en relación a su primer ciclo. Mientras que, en la batería nueva hubo 40% de pérdida de capacidad. Una posible explicación es que las dos baterías utilizadas en este trabajo sufrieron un efecto llamado estratificación del electrolito. Este efecto es un proceso de non homogenización del electrolito en las placas causando una pérdida reversible de la capacidad de la batería a cada ciclo [4, 9]. La capacidad de la batería puede ser recuperada aplicando una sobrecarga, así la gasificación promueve la mezcla del electrolito y por lo tanto la recuperación de la capacidad [9]. Otrosí, las baterías testadas son específicas para aplicaciones automotoras, de electrolito líquido y por lo tanto operan sobre movimiento y estrese vibratorio, lo que promueve una mistura forzada del electrolito.

En las baterías utilizadas en este trabajo, se observó algo similar a lo observado en [9]. Así, creer que los efectos del tiempo de recuperación y pérdida de capacidad, en este trabajo, se quedaron mezclados, imposibilitando una medida de la característica buscada. A pesar de esto, se ha hecho un estudio teórico con el intento de separar los efectos de pérdida de capacidad por estratificación del electrolito de la influencia del tiempo de recuperación sobre el estado de carga.

Inicialmente al observarse la curva de pérdida de capacidad en [9], se percibió que para los primeros 7 ciclos ella puede ser ajustada por una función del tipo  $kx^n$ , donde  $n$  es igual a 0.5. Como los datos de SoC obtenidos en este trabajo, siguen una tendencia parecida a lo observado en [9], tanto para la batería vieja (curva A de la figura 6a), cuanto para la batería nueva (curvas A de la figura 6b), una corrección teórica de este efecto puede ser conseguida sumando una función del tipo  $\alpha x^2$  (curvas B de las figuras 6a y b) a los datos de estado de carga determinado experimentalmente, como puede ser visto en la figura 6a, curva C y en la figura 6b, curva C.

Las curvas C, en ambas figuras, representan lo que sería el estado de carga una vez minimizado el efecto de estratificación del electrolito. La mirada de estas curvas, facilitada por la presencia de flechas negras, explicita la influencia del tiempo de recuperación sobre la cantidad de carga que debería ser conseguida al final de cada ciclo. Se percibe que las dos baterías sufrieron caída de estado de carga en el segundo ciclo, donde no hubo parada para recuperar, en seguida se observa una estabilidad cuando el tiempo de recuperación vale entre 1 y 3 horas para la batería vieja y entre 1 y 4 horas para la batería nueva. A partir de 3 y 4 horas de parada, respectivamente, se observa la recuperación del estado de carga, tanto de la batería vieja, como de la batería nueva.

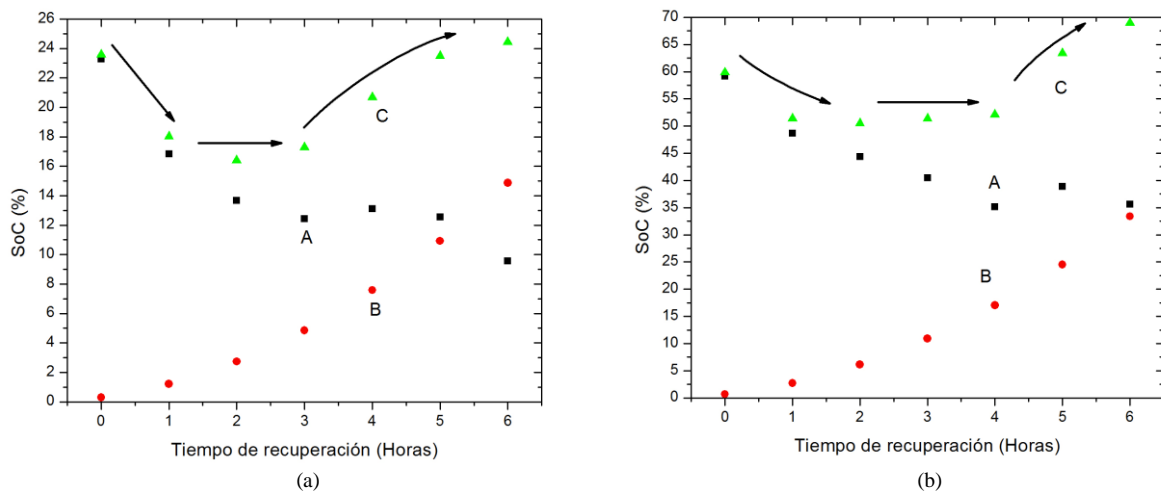


Figura 6. (a) Estados de carga por tiempo de recuperación de la batería vieja y (b) estados de carga por tiempo de recuperación de la batería nueva.

## 7. Conclusión

Los experimentos fueron estables del punto de vista de las mediciones y operación de los equipos. A través de los experimentos se percibió que para las dos baterías, utilizar solamente el voltaje de circuito abierto para estimación del estado de carga no es un método preciso, una vez que los valores de voltaje no son unívocos para distintos valores de estado de carga. Además, en uno de los ciclos de teste, la batería nueva ha presentado un valor de voltaje de circuito abierto más pequeño, comparado con otro dado ciclo, pero con estado de carga más grande. Las curvas de recuperación pos carga se mostraron importante, pues a través de ellas se puede saber cuánto tiempo la batería lleva para tener su voltaje de circuito abierto estable.

Durante los ciclos las baterías han presentado cantidades de carga cada vez más pequeñas en relación a la carga anterior, se cree que eso ocurrió debido al fenómeno de estratificación del electrolito. Por ejemplo, en la batería vieja hubo pérdida de 60% de la capacidad y en la nueva 40%. Así, es importante para sistemas fotovoltaicos que utilizan estos tipos de baterías, tener en cuenta cargas con gasificación después de cierta cantidad de ciclos para recuperación de la capacidad.

Crear que el efecto de aplicarse un determinado tiempo de recuperación entre los ciclos de carga y descarga fue enmascarado por la pérdida de capacidad debida al fenómeno de estratificación del electrolito, imposibilitando una determinación del efecto investigado. A pesar de esto, se ha hecho un estudio teórico con el intento de separar los efectos de pérdida de capacidad por estratificación del electrolito de la influencia del tiempo de recuperación sobre el estado de carga.

Se percibe que las dos baterías sufrieron caída de estado de carga en el segundo ciclo, donde no hubo parada para recuperar, en seguida se observa una estabilidad cuando el tiempo de recuperación vale entre 1 y 3 horas por la batería vieja y entre 1 y 4 horas para la batería nueva. A partir de 3 y 4 horas de parada, respectivamente, se observa la recuperación del estado de carga, tanto de la batería vieja, cuanto de la batería nueva. Para testes más conclusivos, es necesario un cargador más confiable del punto de estabilidad de la tensión y corriente de carga y garantía de carga plena. Además, un procedimiento de gasificación y mezcla del electrolito de la batería a cada ciclo, para que no tenga pérdida de la capacidad.

## Referencias

- [1] Aguera, A. L, Cabo, I. R, “The pierre auger project as a challenging tool for surveing PV systems”. International conference on renewable energy and power quality, 2006.
- [2] Copetti, J. B, Macagan, M. H, “Baterias em sistemas solares fotovoltaicos”, I congresso brasileiro de energia solar, 2007.
- [3] Mischie, S.,Toma, L., “Behavior of the lead-acid battery after the rest period”, WSEAS Trans. on power systems, 3:111-117, 2008.
- [4] Spiers, D. J., Rasinkoski, A. D., “Predicting the service lifetime of lead/acid batteries in photovoltaic systems”, Journal of power sources, 53:245:253, 1995.
- [5] Baldsing, W. G. A, Hamilton, J. A, “Performance of lead/acid batteries in remote area power-supply applications”, 35:385-394, 1991.
- [6]Bosch,“[http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/baterias/downloads/Manual\\_de\\_baterias\\_Bosch\\_6\\_008\\_FP1728\\_04\\_2007.pdf](http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/baterias/downloads/Manual_de_baterias_Bosch_6_008_FP1728_04_2007.pdf)”
- [7] Kong-soon, N, Chien-Sien, M, “State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open circuit voltage”, PECon 08, 972-976, 2008.
- [8] Koutroulis, E, Kalaitzakis, K, “Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications”, Electric Power Applications IEEE, 191-197, 2004.
- [9] Catherino, H. A, Feres, F. F, “Sulfation in lead-acid batteries”, Journal of power sources, 129, 113-120, 2004.